REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCEN

FACULTE DES SCIENCES - DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

UNITE DE RECHERCHE MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES

ECOLE DOCTORALE « Energies Renouvelables »

Mémoire de Magister

Sur le Thème

Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque

Présenté par : ***M^r. MEFLAH AISSA***

Soutenu le : 14 / 11/ 2011

Devant le jury composé de :

Président :	**Mr BOUMEDIENE. BENYOUCEF**	*Professeur, Université de Tlemcen*
Directeur :	**Mr TAYEB. ALAOUI**	*Maître de conférences, Université de Tiaret*
Examinateurs :	**Mr ABDELGHANI. KHEROUS**	*Maître de conférences, Université de Tlemcen*
	M^r ALI. CHERMITTI	*Maître de conférences, Université de Tlemcen*
	Mr CHEIKH. BELFEDAL	*Maître de conférences, Université de Tiaret*

Année Universitaire: 2011/2012

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'assurer une commande vectorielle associée à une électropompe asynchrone immergée. La configuration de ce système comporte un générateur photovoltaïque, un bus PV, un filtre PV connecté à un hacheur survolteur, un bus DC et un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone couplée à une pompe centrifuge. L'objectif de ce système consiste à assurer un fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque pour diverses conditions climatiques.

L'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge a été effectuée moyennant le convertisseur DC/DC.

La technique de commande vectorielle est développée et présentée dans ce mémoire de magister. Une simulation sous l'environnement simulation du logiciel MATLAB de la structure proposée.

Mots clés : *Photovoltaïque, Contrôle MPPT, Machine asynchrone, Hacheur, Onduleur.*

ملخص

الهدف من هذه الرسالة هو توفير آلية تحكم شعاعية لمحرك مع مضخة مغمورة. تكوين هذا النظام يحتوي على مولد للطاقة الشمسية, فلتر ضوئي موصول بمحول للتوتر الكهربائي وعاكس كهربائي للتوتر يغذي محرك تيار متردد حثي موصول بمضخة مركزية.

الهدف من هذا النظام هو ضمان التشغيل في حدود الاستطاعة القصوى للنظام الكهروضوئي لمختلف الظروف المناخية. التأقلم بين المولد الكهروضوئي والشحنة تم بواسطة المحول الكهربائي DC-DC.

تقنية آلية التحكم الشعاعية تم تطويرها وتقديمها في رسالة الماجيستار هذه. المحاكاة تمت بواسطة برنامج المحاكات « MATLAB » وفق الهيكل المقترح.

الكلمات الدلالية : *كهروضوئي, آلية تحكم MPPT, محرك تيار متردد, محول التوتر, عاكس كهربائي للتوتر.*

Abstract

The objective of this thesis is to provide a vector control combined with an electric asynchronous motor. The configuration of this system includes a photovoltaic generator, a PV bus, a PV filter connected to a boost converter, a DC bus and a voltage inverter fed induction machine coupled to a centrifugal pump. The objective of this system is to ensure operation at maximum power of PV system for various climatic conditions. The matching between the photovoltaic generator and the load was determined by the DC / DC converter.

Vector control technology is developed and presented, with the environment of simulation MATLAB on the proposed structure.

***Keywords* :** *Photovoltaic, MPPT control, asynchronous machine, chopper, Inverter.*


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ

Remerciments

Je remercie **ALLAH** le Tout-puissant de m'avoir donner le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je tiens à remercier **Mr Tayeb.Allaoui,** Maître de conférences à l'Université de Tiaret qui a accepté de m'encadrer, et je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

J'exprime mes sincères remerciements à **Mr Boumediene.Benyoucef**, Professeur à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté de présider le Jury de cette thèse.

Je remercie sincèrement **Mr Abdelghani.Kherous**, Maître de conférence à l'Université de Tlemcen, **Mr Ali.chermitti,** Maître de conférence à l'Université de Tlemcen, **Mr Cheikh Belfedal**, Maître de conférence à l'Université de Tiaret, d'avoir accepté de faire partie du Jury.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Mr Meflah Aissa.

Dédicaces

A l'âme de ma mère qui été pour mon corps mieux qu'un cœur ;

A mon cher père qui a sacrifié son temps pour nous ;

A l'âme de mon frère : Kadda ;

A mes sœurs : Chérifa, Mokhtaria et Fatima ;

A mon neveux : Youcef Et mes nièces : Narimane ; Lina ; Iness et Nour ;

A tous ceux qui me sont chers ;

A toute ma grande famille: Meflah, Labeche.

A mes collègues des études;…. Et à tous mes amis.

Meflah Aissa.

Sommaire

Sommaire. Nomenclature. Lexique.

Chapitre III : ***Simulation de la chaine de conversion PV sous MATLAB/SIMULINK***

Chapitre IV : ***Stratégies de commande d'un système de pompage « PV »***

Nomenclature

h : Constante de Planck (6.62.10^{-34} j.s).

υ : Fréquence de l'onde lumineuse (Hz).

$\mathbf{E_g}$: Energie de la bande interdite (eV).

S : Surface du module photovoltaïque (m^2).

E : Eclairement (W/m^2).

$\mathbf{R_{Se}}$: Résistance série équivalente (Ω).

$\mathbf{R_{Pe}}$: Résistance parallèle équivalente (Ω).

A : Le facteur d'idéalité de la jonction.

$\mathbf{I_{ph}}$: Le photo-courant (A).

$\mathbf{I_0}$: Courant de saturation (A).

$\mathbf{R_p}$: Résistances parallèle shunt. (Ω)

$\mathbf{R_S}$: Résistance série (Ω).

Tc : Température de jonction (°K).

$\mathbf{G_0}$: L'éclairement de référence (1000 W/m^2).

$\mathbf{T_0}$: La température de référence (298 °K).

α : Le coefficient de courant en fonction de température (A/°C).

Icc : Le courant de court-circuit (A).

Vco : La tension de circuit ouvert (V).

FF : Facteur de forme.

Ns : Nombre de modules dans le panneau en série.

Np : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

$\mathbf{P_m}$: La puissance maximale produite PV (W).

$\mathbf{V_m}$: Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

$\mathbf{I_m}$: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

$\mathbf{V_{CO}}$: La tension à circuit ouvert de référence (V).

$\mathbf{V_{op}}$: Tension optimale (V).

$\mathbf{I_{op}}$: Courant optimum (A).

$\mathbf{V_{co}}$: Tension à circuit ouvert (V).

$\mathbf{I_{cc}}$: Courant de court-circuit (A).

K : Coefficient de Boltzmann ($1.38.10^{-23}$ J / K).

T_a : Température ambiante (C).

T_c : Température de la cellule (C).

L_n : Longueur de diffusion des électrons (m).

L_P : Longueur de diffusion des trous (m).

g : Taux de génération-recombinaison (m^3/s).

φ : Flux magnétique (weber).

ω : Vitesse de rotation (rad /s).

Q : Débit de la pompe (m^3/h).

HMT : Hauteur manométrique totale (m).

n_s : Vitesse synchrone de rotation du champ tournant en (rad /s).

n_R : Vitesse de rotation du rotor en (tr/s).

Ω_S : Pulsation des courants inducteurs (rad/s).

Ω_R : Pulsation des courants induits (rad/s).

P : Nombre de paires de pôles du moteur.

R_{St} : Résistance statorique du moteur (Ω).

R_r : Résistance rotorique (Ω).

R_m : Résistance de magnétisation (Ω).

L_s : Inductance d'un enroulement du stator (H).

L_r : Inductance d'un enroulement du rotor (H).

L_m : Inductance mutuelle (H).

C_e : Couple électromagnétique (N.m).

C_r : Couple résistant (N.m).

N : Vitesse de la pompe (rad /s).

Lexique

PV : Photovoltaïque.
GPV : Générateur Photovoltaïque.
FF : Facteur de forme.
MPPT : Maximum Power Point Tracking.
P&O : Perturbation et Observation.
DC : Courant Continu (Direct Current).
AC : Courant Alternatif (Alternative Current).
MAS : Moteur asynchrone.
MCC : Moteur à courant continu.
CVFO : Commande vectorielle par flux orienté.
MLI : Modulation par largeur d'impulsions.
IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor.
PI : Proportionnel-Intégral.

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Cet intérêt s'est accru face à l'épuisement inéluctable des énergies fossiles, à leur impact sur l'environnement et aux déchets qu'ils engendrent.

La technologie photovoltaïque (PV) est une solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages :

- Elle est un moyen fiable qui requiert peu d'entretien.
- Elle fournit de l'électricité avec l'énergie gratuite et renouvelable du soleil.
- Elle ne nécessite aucun combustible.
- Elle est silencieuse et non polluante respectueuse de l'environnement.
- Elle est polyvalente et peut être ajustée selon les besoins.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ses besoins en énergie solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées surtout dans les applications du pompage photovoltaïque.

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Le système de pompage PV est généralement composé d'un générateur PV, d'un convertisseur d'énergie, d'un moteur et d'une pompe.

Deux types de systèmes peuvent être utilisés, le premier est constitué d'un générateur PV couplé directement à un groupe motopompe, le deuxième est composé d'un générateur PV couplé à une motopompe CC ou AC à travers un convertisseur continu-continu fonctionnant en **MPPT** (Maximum Power Point Tracking) pour la machine continue, et toujours un convertisseur continu-continu fonctionnant en MPPT couplé à un convertisseur continu-alternatif pour la machine alternative.

Due au coût élevé du générateur photovoltaïque et à la désadaptation existante entre les caractéristiques I=f (V) du générateur et de la charge, une grande importance est donnée à leur conception et à leur utilisation optimale qui permettent un fonctionnement fiable et économique.

L'objet de notre mémoire porte sur la présentation de la technique d'adaptation et commande de ces systèmes en vue d'un meilleur rendement d'utilisation du générateur PV.

L'étude effectuée est axée et orientée vers l'optimisation de la puissance du générateur PV, et sur l'incorporation d'un convertisseur continu-continu commandé par un algorithme de recherche du point de puissance maximale (**MPPT**).

Cette étude concerne la modélisation, l'analyse et l'optimisation du système de pompage photovoltaïque comportant un générateur PV, un convertisseur continu-continu et un groupe motopompe.

La modélisation des différents éléments d'un système photovoltaïque est une étape indispensable qui doit précéder toute phase de dimensionnement, commande ou de simulation.

Le document présenté est rédigé en quatre chapitres principaux résumés dans ce qui suit :

Dans le premier chapitre, on va faire une description générale, et le principe de fonctionnement de chaque élément constituant le système photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des éléments du système de pompage photovoltaïque (champ photovoltaïque, onduleur et groupe motos-pompe). Dans une première étape, en exposant d'une manière détaillée la modélisation mathématique, le principe de fonctionnement et la caractéristique I=f (V) du générateur. Dans une seconde étape, un aperçu théorique sur le moteur à induction (ou moteur asynchrone) et les pompes qui peuvent être utilisés dans le pompage PV. Il présente aussi le modèle mathématique de chacun de ces composants.

Dans le troisième chapitre, on va présenter les résultats des performances des composants de la chaine de conversion photovoltaïque (panneaux solaires, hacheur, MPPT,) obtenues sous l'environnement de simulation (MATLAB/SIMULINK).

Enfin dans le dernier chapitre, nous présenterons les différentes stratégies de commande du système de pompage photovoltaïque, commencerons par la commande MLI (Modulation de Largeur d'impulsions), après nous traiterons la commande vectorielle par flux orienté, et les performances de ces commandes pour le groupe motopompe et le système de pompage globale.

Chapitre I :
" Description générale d'un système de conversion photovoltaïque "

I-1 Introduction

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations [2]:

a - Non autonomes ou « grid-connected » rattachées au réseau de distribution électrique. Dans Les systèmes reliés aux réseaux, les consommateurs standards de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur).

Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public et les demandes de puissance sont attachées sur le réseau.

b - Autonomes ou « stand-alone », ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est-elle est assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments [2].

- Un ou plusieurs modules PV.
- Le système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries.
- L'onduleur.

Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système de conversion photovoltaïque « stand-alone », sans tenir compte du stockage, et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant.

La **Figure I.1** présente un schéma simplifié d'un système de pompage photovoltaïque :

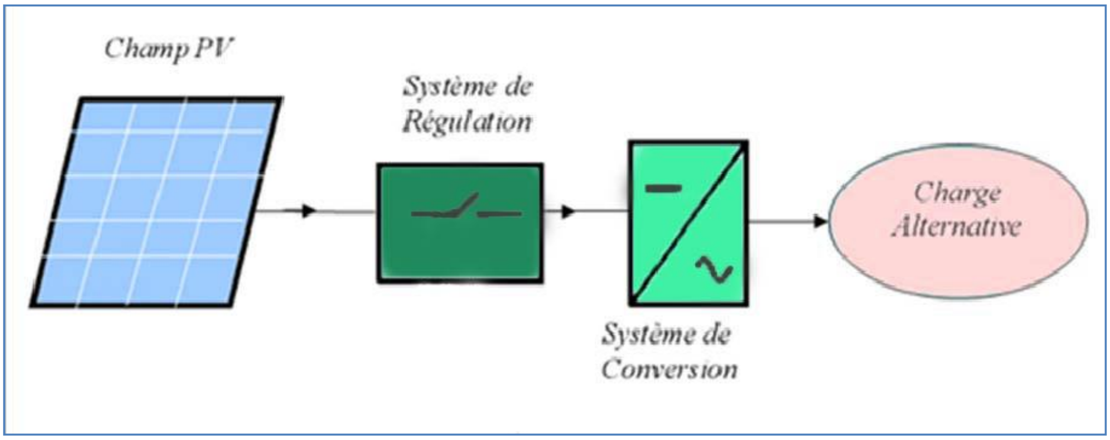


Figure I.1 : Schéma simplifié d'un système PV [3].

I- 2 Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène–hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [4].

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5µm, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ

5780°k [5] :

- Diamètre de soleil : D_s =1.39.10^{9}m.
- Diamètre de la terre : D_t =1.27.10^{7}m.
- Distance moyenne soleil-terre : Lts =1.5.10^{11}m.

I-2-1 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM_0. Sa distribution en énergie est répartie en [5]:

Ultraviolet UV 0.20 < l < 0.38 mm 6.4% Visible 0.38 < l < 0.78 mm 48.0%

Infrarouge IR 0.78 < l < 10 mm 45.6%

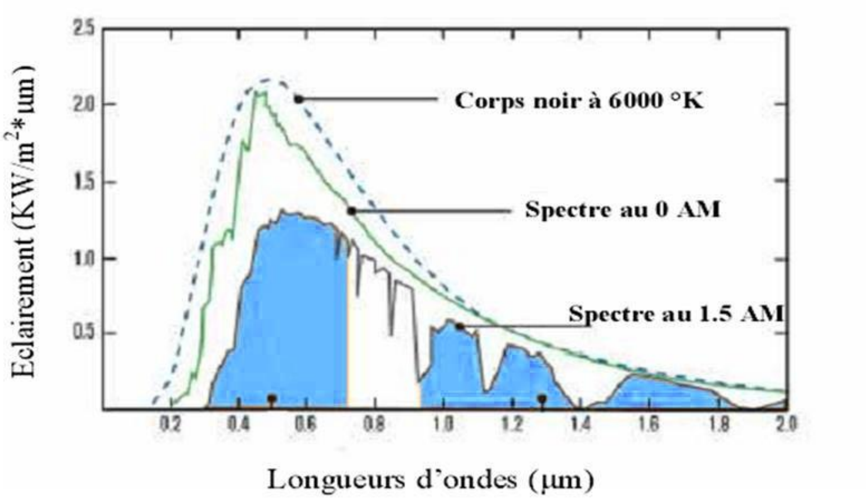


Figure I.2 : spectre solaire hors atmosphère [5].

I-2-2 Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell−Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est biens visible sont enregistrées ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil.

I-3 Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque

I-3-1 la cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découvert par E. Becquerel en 1839 [6]. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

Dans **la Figure I.3** un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire, Elle se compose d'un abri du verre (g), un encapsulant (e), et un métal en arrière contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident [7].

La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie (hv) est supérieure à celle de l'énergie du matériau, a appelée l'énergie de bande gap (Eg), le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type-p et celui de trous du semi-conducteur de type-n augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à Eg, ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

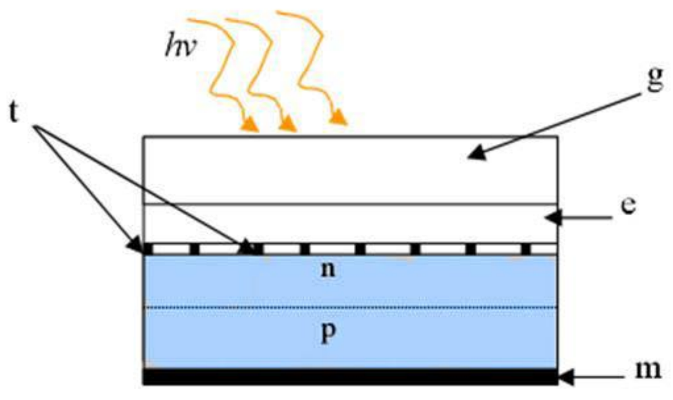


Figure I.3 : Schéma d'une cellule solaire.

Dans une cellule PV, une large fraction de ces électrons et trous atteignent la jonction p- n, et un champ électrique est créé. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les matériaux de type-n et type-p à un circuit extérieur. La direction de ce courant est l'opposé de celle de la cellule lorsqu'elle fonctionne en tant que diode, autrement dit, quand la diode est illuminée, un courant positif « I » traverse de n vers p.

La puissance électrique produit par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt [8].

Le rendement de conversion des cellules commercialisées atteint actuellement 15 à 19% pour le silicium monocristallin, 12 à 16 % pour le silicium poly-cristallin, 7 à 9% pour le silicium amorphe.

Pour élever la tension, les cellules sont commercialisées sous forme des modules photovoltaïques.

I-3-2 Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module **Figure (I.4-a).** Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthyléne-vynil-acétate) **Figure (I.4-b)** et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [9].

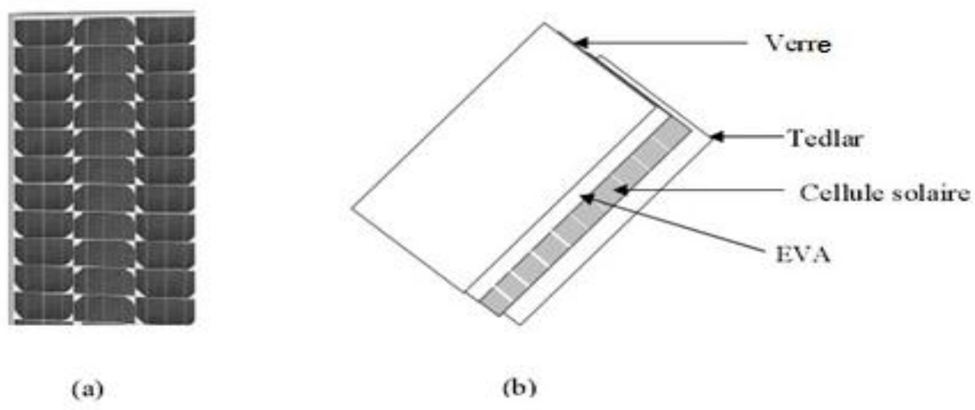


Figure I.4 : Module photovoltaïque.

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

A l'arrière de chaque module se trouve une boite de jonction contenant 2 diodes antiparallèles **Figure (I.5)**. Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [10].

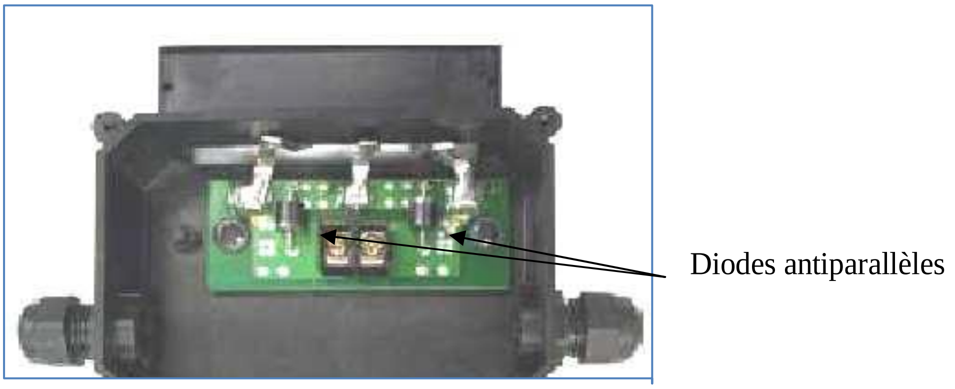


Figure I.5 : Boite de jonction [10].

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

Les modules en silicium monocristallin (c-Si, 64% de marché), poly cristallin ou multi cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-Si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48) et des puissances entre 10 et 100 Wc (watt-crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [9].

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [11].

I-3-3 Caractéristiques d'un module [12]

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes :

- ***La puissance de crête, Pc :*** Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).
- ***La caractéristique* I=f (V) *:*** Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- ***Tension à vide,* Vco *:*** Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- ***Courant de court-circuit,* Icc *:*** Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- ***Point de fonctionnement optimum,* Pm (Vm, Im)** *:* Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m . I_m$
- ***Rendement :*** Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- ***Facteur de forme :*** Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : Vco . Icc

I-3-4 Le panneau solaire

Le panneau solaire **Figure I.6** ou (champ solaire) se compose de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise.

Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure I.6 : Panneau solaire [10]

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boite de dérivation qui regroupe le tous, comme l'illustre **la Figure I.7**, alors cette boite de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.



Figure I.7 : Boite de dérivation [10].

La boite de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur lequel se trouvent :

- Des diodes Schottky en séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boite à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boites permet d'avoir une sortie en 12, 24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- Des besoins en électricité.
- La taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.

1-4 Système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continue), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

L'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil [13].

1-4-1 Le convertisseur continu-continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal [13]. Ce système d'adaptation est couramment appelé **MPPT**. Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Ce système a deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

1-4-2 Le convertisseur continu-alternatif

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

a- Rotatif : C'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW.

- Ses avantages sont :
  - Simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité.
- Ses inconvénients sont :
  - Cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

b- Statique : On le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en **MLI** (modélisation de largeur d'impulsion) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale [13]

Avec ce système, on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide.

La **Figure I.12** illustre un onduleur triphasé autonome à fréquence variable à commutation forcé de type **MLI** opéré en source de tension. Il est alimenté à partir de la tension continue générée conjointement par le redresseur et le hacheur série, il est réalisé à base de transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Le choix de ce type de composant relève, d'une part de sa particularités à pouvoir commuter de très grandes valeurs de courant et tension à des fréquence de découpage de plusieurs dizaines de KHz et d'autre part, parce qu'il permet la suppression de tous les circuits d'aide à la commutation des montages à thyristors [5].

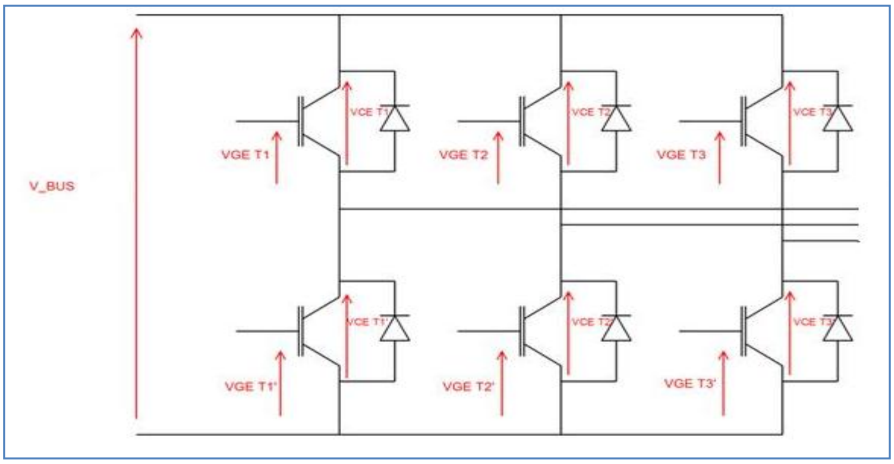


Figure I.12 : Schéma de L'onduleur [5].

Les caractéristiques d'un convertisseur continu-alternatif sont :

a- La puissance nominale *:* C'est la puissance que le convertisseur est capable de délivrer en fonctionnement permanant. Théoriquement, le choix de la puissance à délivrer doit être la somme des puissances des équipements installés ou à installer, mais en pratique, il est rare que tous les appareils fonctionnent en même temps et le choix de la puissance nominale résultera de la valeur maximale du profil moyen de la consommation.

b- Le rendement : c'est un critère très important, car il influe sur le dimensionnement du champ PV et de la batterie. Celui-ci varie en fonction du taux de charge (rapport de la puissance de sortie et de la puissance nominale), ainsi que la variation de ce rendement varie d'un onduleur à un autre. Le rendement de l'onduleur est aussi donné entre l'énergie consommée par la charge et l'énergie fournie par la source continue.

c- La consommation à vide : Une consommation importante à vide va réduire l'énergie emmagasinée par la batterie (cas de nuit) [14]. Pour cette raison, il est important de limiter les pertes à un faible pourcentage de la puissance nominale (1 à 5%). Pureté de la tension sinusoïdale pure (220v – 50Hz).

La pureté de la tension de sortie est obtenue grâce à :

- Un système de régulation qui rend à maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales, quelle que soit la tension d'entrée.
- Un filtrage en sortie de l'onduleur, qui tend à lisser la forme de la tension donc à réduire le taux d'harmonique.

I-5 La Charge

La charge et l’équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d’eau, ou de type alternative dans les cas d’usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur.

I-6 Installation des panneaux

Pour installer les panneaux solaire dans un site, il est nécessaire de vérifier les conditions suivantes [4] :

a- Disposition des panneaux

Les structures doivent êtres solides, fixées au sol, pour résister à des vents d’au moins de 150 Km/h. De plus, elles doivent être fiables dans le temps, elles doivent utiliser un matériau de bonne fiabilité (outre l’aluminium anodisé, la visserie inox et la visserie inviolable).

b- Fixation des panneaux

La fixation des panneaux doit assurer correctement les fonctions suivantes : [14]

- Maintien de l’orientation.
- Résistance contre le vent et les autres intempéries.
- Résistance contre les agressions mécaniques.
- Protection contre les salissures, et agressions venant du sol.
- Ventilation des panneaux afin de limiter leur échauffement.

c- L’orientation des panneaux

L’installation des modules peut se faire sur un toit si son orientation et son inclinaison sont bonnes ou à même le sol pour peu que l’endroit soit bien dégagé, aéré (10 cm d’espace sous les modules est vivement conseillé) et protégé. On les place habituellement avec la pente vers l’équateur (vers le sud dans l’hémisphère nord). L’inclinaison des panneaux n’est pas critique.

On la prend en général égale à la latitude, avec une tolérance de 15°. La hauteur maximale du soleil variant au cours de l'année, on choisira une inclinaison supérieure ou inférieure à la latitude suivant que les besoins sont les plus importants lorsque la course du soleil est basse (éclairage, besoins importants en hiver dans l'hémisphère nord) ou haute (irrigation...). [7]

Toutefois, l'inclinaison des modules devrait rester supérieure à 10° pour assurer un auto-nettoyage lors des pluies. [11]

Il existe aussi des structures beaucoup plus complexes qui suivent le soleil dans son mouvement quotidien pour augmenter l'énergie captée, la présence des pièces mobiles réduit la fiabilité et entraîne des coûts supplémentaires élevés. Ces structures sont surtout utilisées pour des systèmes photovoltaïques à concentration où seul le rayonnement direct est concentré sur la surface active [11]. Il arrive cependant qu'il soit impossible d'installer le panneau exactement face au sud.

d- Câblage électrique

Il sera à l'extérieur, exposé au vent, au gel, au soleil et autres agressions. Il est strictement nécessaire d'utiliser des câbles adaptés à des sections suffisantes. [16]

Nous allons d'abord effectuer un branchement par un câble électrique qui sera un câble de qualité par exemple, il devra subir les agressions du vent, de la pluie, du soleil, du gel, croissance marines et autres. La section sera d'au moins 1.5 mm², 2.5 mm² dès que la longueur excède 25 m ou que la puissance du module soit supérieure à 100 W [10].

e- Câblage de liaison

Il se trouve entre les modules et le régulateur, il doit être d'une section d'au moins 2,5 mm² ou plus si la longueur excède 15cm. Pour une intensité inférieure à 4 A, sa section sera calculée de façon à ne pas avoir plus de 6% de chute de tension.

I-7 Avantages et inconvénients d'une installation PV

a- Avantages [14]

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

b- Inconvénients [14]

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité.

De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

I-8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque. Aussi que les principes de fonctionnement de chaque élément, ce qui permet d'introduire à la modélisation et l'analyse de ce système, chose qu'on va présenter dans le chapitre II.

Chapitre: II

" Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque "

II-1 Introduction

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un hacheur, un onduleur et un groupe motopompe. Les systèmes de pompage photovoltaïque fonctionnent au fil du soleil, dans ce chapitre la modélisation de chaque composant de ces systèmes est présentée.

II-2 La modélisation du champ photovoltaïque

II-2-1 La modélisation d'une cellule solaire

a- Cas idéal [17]

La Figure ci-dessous présente un schéma simplifié d'une cellule solaire idéale :

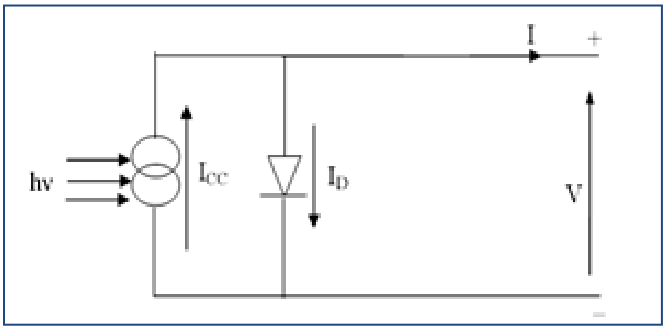


Figure II.1 : Cellule solaire idéale

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme:

$$I = Icc - I_D = I_{CC} - I_0\left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1\right) \qquad (II.1)$$

I, V : Courant et tension fournis par la cellule. I_D : Courant de diode donnée par:

$$I_D = I_0\left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1\right) \qquad (II.2)$$

b- Cas réel :

La performance d'une cellule solaire est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances (R_S et R_P) [18].

- **R_S :** Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contactes (Semi-conducteur, électrodes). Elle s'exprime par : [19]

$$R_s = \rho.\frac{L}{S_g} + R_m \qquad \text{(II.3)}$$

Avec :

ρ : La résistivité de la grille.

L : La longueur de la grille.

S_g : Section des grilles collectrices.

R_m : Résistance propre du matériau, sa valeur est faible (< 2Ω pour les cellules au silicium)

- **R_p :** Résistance parallèle, dite « Shunt », provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non idéalité de la jonction.

R_S et R_p modifient le courant de court-circuit de la cellule en photo- courant I_{ph}, on aura donc le montage électrique équivalent suivant [18] :

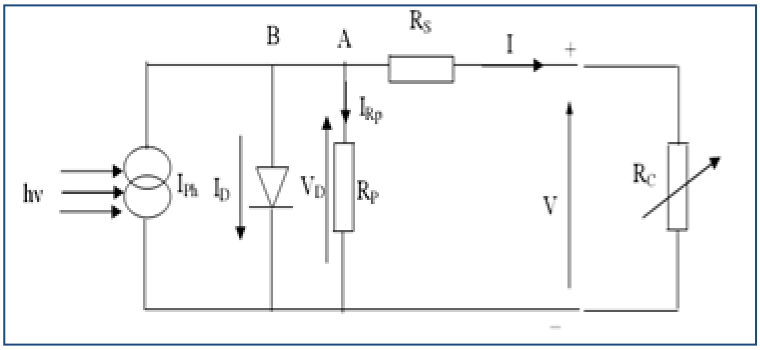


Figure II.2 : Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle

Appliquons la loi de Kirchhoff aux nœuds A, B :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \qquad \text{(II.4)}$$

Le courant I débité par la cellule est la somme algébrique de trois courant :

- I_{ph} : Photo courant indépendant de V (ou de R_S), il est proportionnel au flux incident (taux de génération-recombinaison) et aux longueurs de diffusion des porteurs [17]

$$I_{ph} = q\,g\,(L_n + L_p) \qquad (II.5)$$

- I_{Rp}: Courant traversant R_P, si R_P est très grande, il devient très faible est indépendant du tension [20]

$$I_{Rp} = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V + R_S I}{R_P} \qquad (II.6)$$

Car : $$V_d = R_p I_{Rp} = V + R_S I \qquad (II.7)$$

- I_D : Courant diode, il est de même ordre de grandeur que I_{Rp} pour les faibles tensions et il devient très grand au voisinage de V_{CO}, il s'écrit sous la forme [17] :

$$I_D = I_0\left(e^{\frac{qV}{AKT}} - 1\right) \qquad (II.8)$$

Remplaçons dans (II.4) les équations (II.5), (II.6) et (II.8), l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_{ph} - I_0\left(e^{\frac{qV}{AKT}} - 1\right) - \frac{V + R_S I}{R_P} \qquad (II.9)$$

A : est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de Charge d'espace.

Pour les cellules actuellement commercialisées au Silicium, on prend A=1.

La représentation graphique I = f (V) de l'équation (II.9) est illustrée dans la **Figure II.3 :**

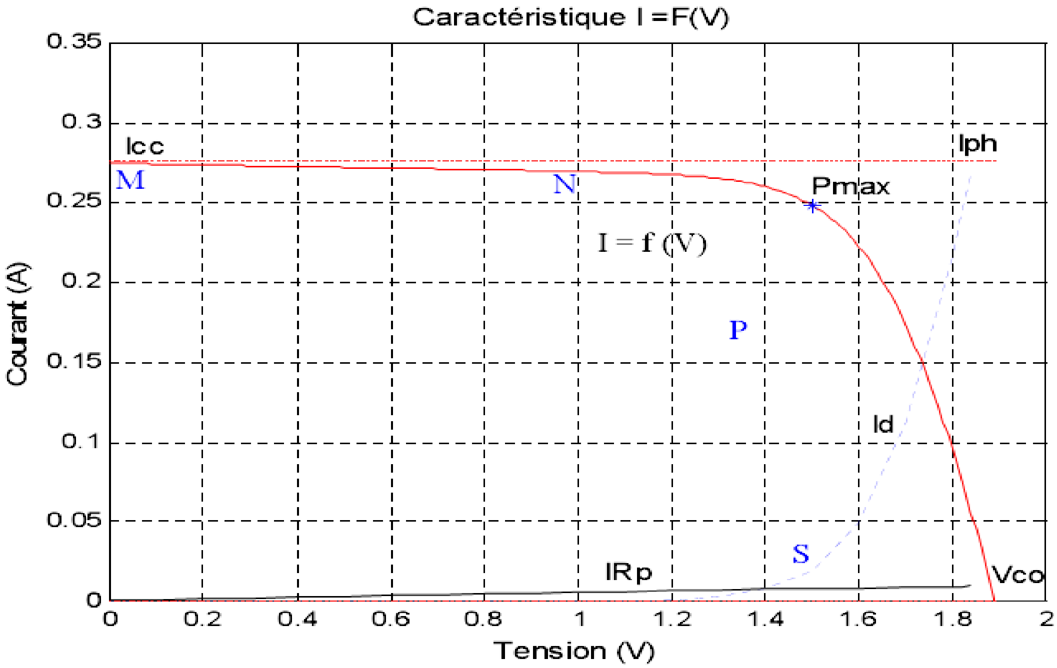


Figure II.3 : Caractéristique d'une cellule solaire.

II-2-2 Caractéristique I=f (V) d'une cellule solaire

La caractéristique I= f (V) représente la courbe de puissance, sachant que le courant généré est donné par la formule (II.9) et que la cellule fonctionne sous un éclairement fixe E et une température constante T.

Le fonctionnement du module est caractérisé essentiellement par trois zones :

- **Zone MN :** Le courant I est donné presque constant la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de I_{CC}). Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.
- **Zone PS :** Région correspondante aux valeurs élevées de R_C. La cellule se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert V_{CO}. Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.
- **Zone NP** : Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables.

II-2-3 Paramètres caractéristique d'une cellule solaire

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituants le champ PV :

- **Courant de court-circuit I_{CC}**

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation (II.9) :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0\left(e^{\frac{qR_S I_{cc}}{KT}} - 1\right) - \frac{R_S I_{cc}}{R_P} \qquad \text{(II.10)}$$

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_S \rightarrow 0$ et $R_P \rightarrow \infty$)

$$I_{cc} = I_{ph} = qg\,(L_n + L_p) \qquad \text{(II.11)}$$

Tenant compte de l'effet des résistances R_S et R_P ; le courant de court-circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

- **Tension en circuit ouvert**

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (II.9)

$$I = I_{ph} - I_0\left(e^{\frac{qV}{AKT}} - 1\right) - \frac{V + R_S I}{R_P} \qquad \text{(II.12)}$$

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_S \rightarrow 0$, $R_P \rightarrow \infty$, $I_{ph} = I_{cc}$ et $A = 1$)

$$V_{co} = \frac{nKT}{q} \mathrm{Log}\left[1 + \frac{I_{cc}}{I_o}\right] \qquad \text{(II.13)}$$

- **Facteur de forme FF**

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{I_m.V_m}{I_{cc}.V_{co}} \qquad (II.14)$$

Il caractérise l'influence mixte des résistances série et parallèle sur la caractéristique I = f (V).

- **Rendement énergétique maximum η_m**

Le rendement énergétique maximum est le rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_m.V_m}{E.S} \qquad (II.15)$$

S : Surface de la cellule solaire.

E : Flux incident.

(I_m, V_m) : Coordonnées du point de fonctionnement.

II-2-4 Groupement des cellules solaires

a- Module photovoltaïque

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (groupement de cellules en série) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante [18] :

$$I' = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q}{n.AKT}(V'+R_{se}I')} - 1 \right) - \frac{V'+R_{se}I'}{R_{Pe}} \qquad (II.16)$$

Avec I' : Le courant débité par le module photovoltaïque.

Et : R_{se} et R_{Pe} résistance série et parallèle du module défini par :

$R_{Se} = n.R_S$ et $R_{Pe} = n.R_P$

b- Panneau photovoltaïque

La modélisation d'un panneau composé de N_S modules en série et N_P modules en parallèle est [17]:

$$I' = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left(e^{\frac{q}{n.AKTN_s}(V' + R_{se} I')} - 1 \right) - N_p \frac{V' + R_{se} I'}{R_{Pe}} \qquad \text{(II.17)}$$

Avec : R_{Se} et R_{Pe} résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_{se} = n.\frac{N_s}{N_p}.R_s \qquad \text{Et} \qquad R_{pe} = n.\frac{N_s}{N_p}.R_p$$

II-2-5 Facteurs limitatifs du rendement

- **Influence de l'éclairement**

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique I= f (V) suivant l'axe des courants.

L'croissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [21].

L'influence du flux lumineux sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur les figures (II.4), (II.5) et (II.6) à une température constante T= 25 ^oC.

- **Influence de la résistance série R_S**

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contactes ohmiques de la cellule.

Les contacts semi-conducteur – électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion.

- **Influence de la résistance parallèle R_P**

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structurales du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence des fissures et des défauts des structures complexes le siège de phénomène physique devient assimilable aussi à une résistance parallèle (R_P).

Ordre de grandeur de R_P pour une cellule au Si : $R_P = 10^2$ à $10^4\Omega$. R_P augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle.

- **Influence de la température**

Si la température de la cellule augmente, le photo-courant I_{ph} augmente également due principalement à la diminution du largueur de la bande interdite du matériau. Cette augmentation est de l'ordre de 0,1% par degré °C. Le courant directe de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite et entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 mV par cellule [22].

La diminution de la puissance fournie est estimée environ de 0,5% par degré pour un module [23].

L'influence de la température sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur les figures (II.7), (II.8) et (II.9) pour un éclairement fixe E =1000W/m².

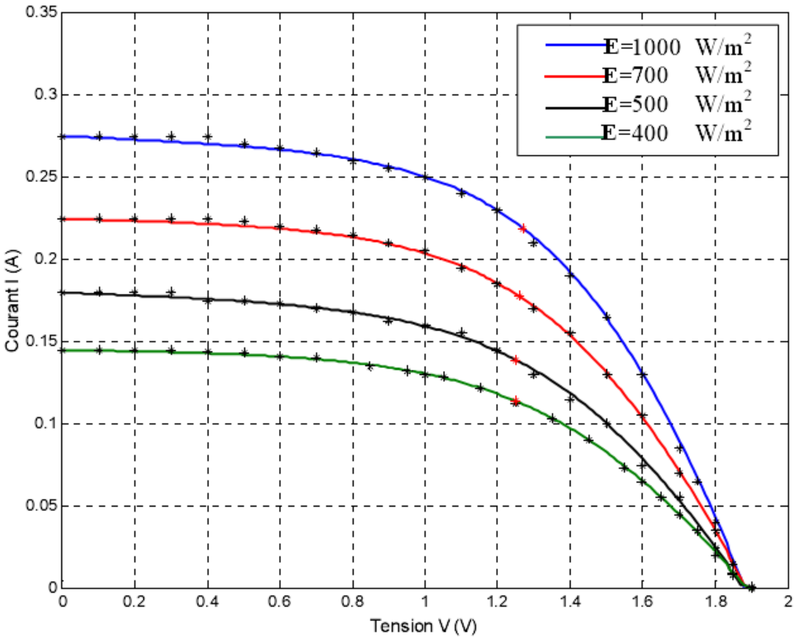


Figure II.4 : L'influence du flux sur la caractéristique I = f (V) de la cellule solaire.

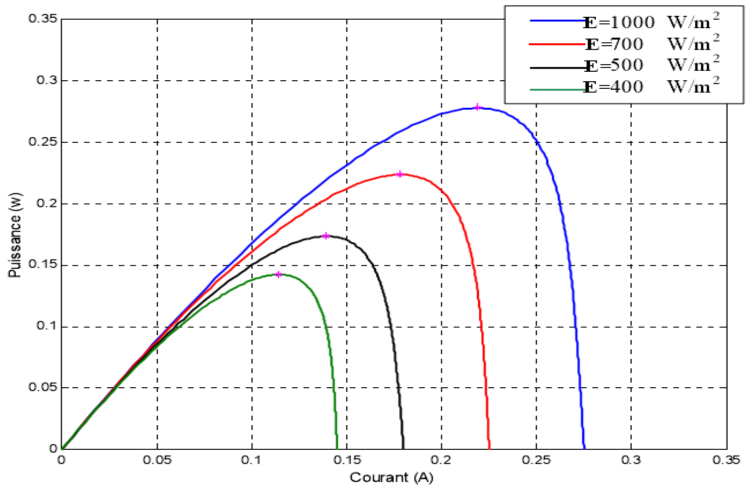


Figure II.5 : L'influence du flux sur la caractéristique P = f (I) de la cellule solaire.

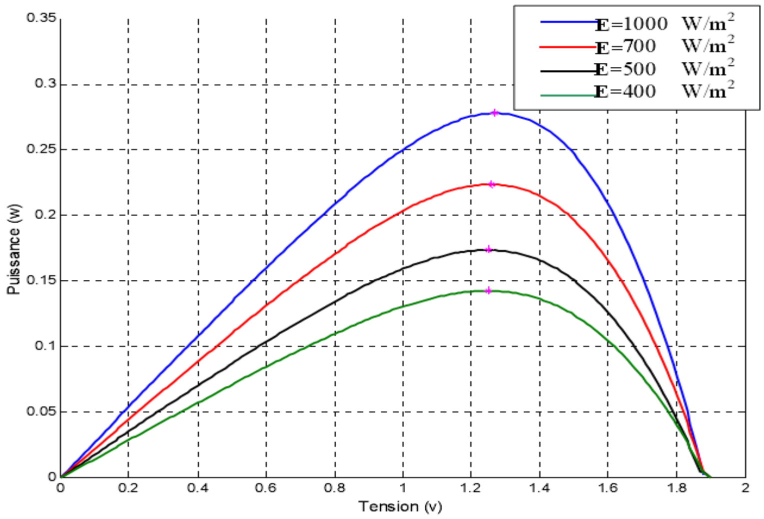


Figure II.6 : L'influence du flux sur la caractéristique P = f (V) de la cellule solaire.

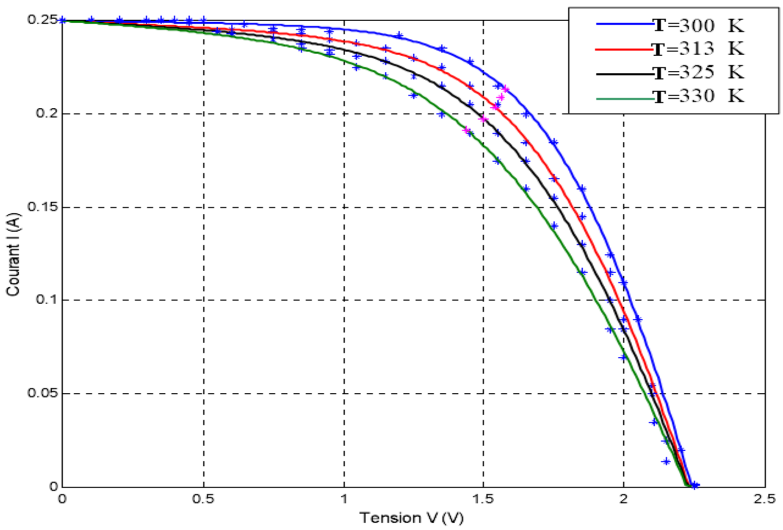


Figure II.7 : L'influence de la température sur la caractéristique I = f (V) de la cellule.

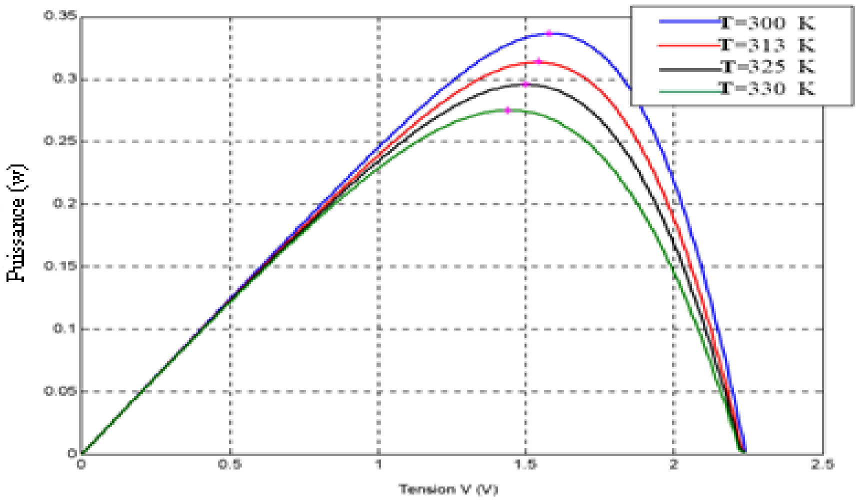


Figure II.8 : L'influence de la température sur la caractéristique P = f (V) de la cellule.

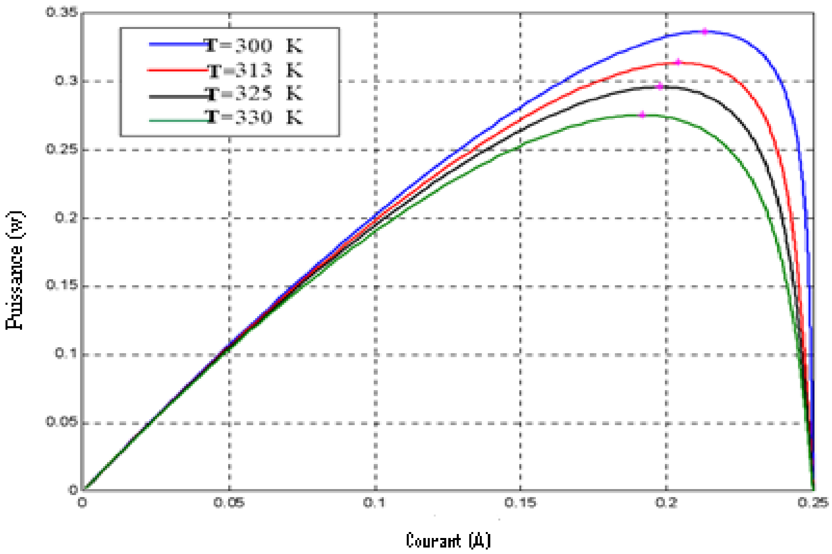


Figure II.9 : L'influence de la température sur la caractéristique P = f (I) de la cellule.

II-3 Les convertisseurs

II-3-1 Les convertisseurs d'énergie

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge pour une charge continu (sans stockage avec une charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (après stockage, il sera appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

Le convertisseur remplit les fonctions suivantes [24]

- Conversion de courant continu en courant alternatif compatible avec la tension du réseau.
- Optimisation de la tension continue de manière à ce que le champ de modules fonctionne dans des conditions de puissance optimales.
- Sécurité.

1- Le convertisseur continu-continu (DC-DC)

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximale [24].

a - Hacheur dévolteur

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT…) et en série avec la source **Figure II.11.b** et une diode de roue libre. Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le MOSFET passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à DT, avec D: est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1.

Lors de la seconde, on bloque le MOSFET. La diode devient passante. Cette phase dure de DT à T.

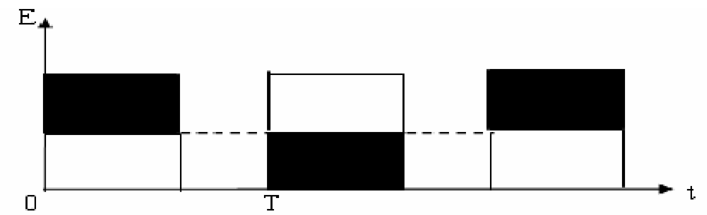
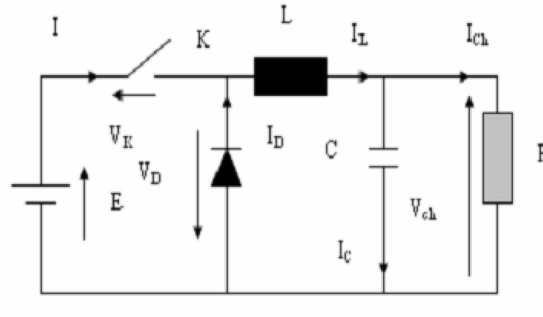


Figure II.10: Tension de sortie.

b - Hacheur survolteur

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée.
Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source, **Figure II.11.a**

Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en court-circuit la résistance R pendant une durée t_f = DT bien déterminée ; cette mise en court-circuit est assurée par un hacheur branché en parallèle avec la résistance.



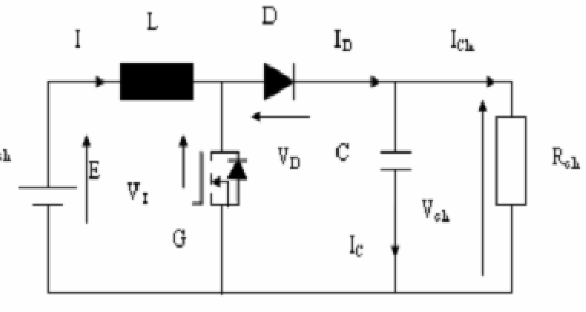


Figure II.11.a: Hacheur survolteur. **Figure II.11.b**: Hacheur dévolteur.

2- Le convertisseur continu-alternatif (DC-AC)

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif « **onduleurs autonomes** »

La conception de l'ensemble du système photovoltaïque de façon à extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque, quelles que soient les perturbations d'éclairement et de la température, l'alimentation sous la tension alternative des appareils à partir des panneaux solaires nécessitent l'utilisation d'un onduleur assurant la conversion DC/AC. Il peut être conçu à base de transistors de puissance ou à thyristors utilisés comme commutateurs de puissance. [25,26]

La fréquence de commutation de semi-conducteurs détermine la fréquence de la tension de sortie. L'onduleur autonome impose lui- même la forme et la fréquence de l'onde de sortie.

Dans le système de pompage photovoltaïque, la connexion entre le générateur photovoltaïque et la pompe entraînée par un moteur à courant alternatif est faite par un onduleur. Ce dernier permet de réaliser un transfert optimal de puissance entre le générateur et le groupe moto- pompe sous les conditions variables de la puissance produite et de la demande en puissance. Ce transfert est contrôlé par variation de fréquence.

Selon le mode de commutation, on peut distinguer [27]:

- Onduleur à onde rectangulaire
- Onduleur à créneaux de largeur variable.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Le choix de l'une des solutions est tributaire des aspects suivants : coût, fiabilité, performances, disponibilité des composants, etc.

Dans notre système, nous pouvons utilisé un onduleur de tension en MLI triphasée, spécialement pour l'alimentation des récepteurs triphasés, tel qu'un groupe motopompe à tension et à fréquence variable.

II-3-2 Structure de convertisseur

Le convertisseur DC/AC se compose des parties suivantes [27] :

- **Etage de puissance**

  Il est constitué des semi-conducteurs de puissance (transistor ou thyristor) utilisés comme commutateurs. Son rôle est de hacher la tension continue d'entrée.

- **Circuit de génération des signaux MLI**

  Ce circuit génère des signaux triphasés en modulation de largeur d'impulsion (MLI) et assure le transfert optimal de puissance du générateur vers le group motopompe, en maintenant le rapport tension / fréquence constant.

- **Alimentations**

  Ce circuit imprimé sert à l'alimentation des différents circuits électroniques du convertisseur.

- **Circuit de régulation et de protection**

  Ce circuit assure la régulation de la fréquence et la protection du groupe motopompe contre les surcharges et le manque d'eau [25,26].

II-3-3 Différents types d'onduleurs

Il existe deux types d'onduleurs qui se différentient par la nature de la fréquence de sortie, soit fixe ou soit variable, qui sont [27]:

a- Onduleur à fréquence fixe

Son utilisation dans les systèmes de pompage nécessite l'interposition des batteries d'accumulateurs entre le générateur photovoltaïque et l'onduleur, ainsi la tension de fonctionnement du système est fixée par le système de stockage.

b- Onduleur à fréquence variable

Pour le fonctionnement au fil du soleil, assurant l'adaptation aux points de fonctionnement optimaux et utilisant des moteurs optimisés en rendement, cet onduleur s'adapte précisément aux systèmes de pompage photovoltaïques. Il délivre des signaux d'amplitude crête constante, mais de fréquence variable proportionnelle à la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque. La tension crête des impulsions est fixée par le circuit de contrôle de l'onduleur.

II-4 Moteur à induction

II-4-1 Critères du choix du type du moteur

La pompe nécessite une énergie mécanique en entrée pour fonctionner. Cette énergie mécanique est fournie dans la plupart des cas par un moteur.

Généralement, trois types de moteurs sont utilisés dans les systèmes de pompage PV :

- Les moteurs à courant continu.
- Les moteurs à courant alternatif (asynchrones).
- Les moteurs à courant continu, sans balais, à commutation électronique (Brushless permanent magnet DC motors).

Les critères qui permettent d'établir le choix le plus judicieux du moteur sont les suivants [27] :

- Bon rendement.
- Souplesse de fonctionnement.
- Robustesse du matériel afin de limiter au maximum l'entretien et les risques de pannes.
- Fiabilité et autonomie de l'installation.
- Faible puissance au démarrage.

II-4-2 Avantages et inconvénients des moteurs

Quelques avantages et inconvénients de chacun de ces moteurs [28, 22, 27] :

	Avantages	**Inconvénients**
Moteur asynchrone	- Disponible dans le marché avec un coût bas. - Son entretien est nul de fait de l'absence complète de pièces en frottement. - Son utilisation augmente l'autonomie et la fiabilité de l'installation. - Disponible pour une large plage de charge. - Le rapport puissance / poids est élevé.	- Nécessité d'utiliser un onduleur avec des spécifications photovoltaïques (coût supplémentaire). - Chute de rendement aux faibles puissances. - Appel de courant au démarrage qui peut atteindre cinq fois l'intensité normale.
Moteurs à courant continu avec balais	- Simplicité et facilité de régulation (variation de vitesse, couple,..) - Couplage direct avec le générateur (sans onduleur). -Rendement élevé pour les faibles charges.	- Présence de balais et collecteur qu'il faut vérifier périodiquement. - Plus lourd et plus coûteux.
Moteurs à courant continu sans balais (brushless DC)	- Rendement élevé pour une large gamme de vitesse. - Couplage directe avec le générateur photovoltaïque. -Moins de maintenance avec une bonne fiabilité. - Un rapport couple / poids élevé, d'où un volume modéré.	- Nécessite un système de commutation (coût supplémentaire).

Tableau II.1 : Résumé des principaux avantages et inconvénients de différents types des moteurs utilisés le plus souvent dans les systèmes de pompage PV.

II-4-3 Structure du moteur asynchrone [17]

On classe les différentes pièces rencontrées dans toute machine tournante selon les trois grandes fonctions réalisées : électrique, magnétique et mécanique.

a- Le stator : Partie fixe constitué par la carcasse du moteur sur laquelle est montées trois enroulements (bobines) parcourus par des courants triphasés et possède p paires de pôles. Les enroulements sont décalés de 120° ente eux.

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme , qui est la vitesse angulaire du champ magnétique tournant. Elle s'exprime en « rad /s », et reliée à la pulsation du courant triphasé et au nombre de paires de pôles du moteur.

La vitesse angulaire de synchronisme n_S est:

$$n_s = \frac{f}{p} \qquad \text{(II.18)}$$

n_s: vitesse synchrone de rotation du champ tournant en (rad /s).
P : nombre de paires de pôles du moteur.
f : fréquence des courants alternatifs en rad/s.

b- Le rotor : Partie tournante solidaire de l’axe du moteur, n’est pas relié à aucune alimentation. Il en existe deux types :

- **Rotor en cage d’écureuil :** constitué des barres métalliques (alliages aluminium pour l’alléger) parallèles sont reliées par deux couronnes de faible résistance. Ce rotor facile à construire présente un faible coût.

- **Rotor bobiné :** les barres métalliques forment un enroulement triphasé. Les extrémités de ces enroulements sont soudées à trois bagues.

Des balais frottant sur ces bagues permettent d'accéder au rotor.

Le rotor tourne à la vitesse de rotation $n_R < n_S$.

Ces conducteurs sont parcourus par des courants induits : courants de Foucault.

c- Entrefer: l'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor.

La relation entre la pulsation et la fréquence du courant:

$$\Omega = 2\pi f \qquad (II.19)$$

Rappelons également les relations entre vitesse angulaire et fréquence de rotation f_s

Si f_S est en tr/min $$\omega_S = \frac{2\pi . f_S}{60} \qquad (II.20)$$

Si f_S est en tr/s $$\omega_S = 2\pi . f_S \qquad (II.21)$$

- ***Glisement* S :** le rotor du moteur tourne toujours un peu moins vite que le champ tournant (vitesse de synchronisme n_S). On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant.

Le glissement S c'est l'écart relatif entre la vitesse de synchronisme n_S et sa vitesse réelle n_R.

Le glissement est défini par: $$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \qquad (II.22)$$

n_S : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (imposé par le réseau) en (tr/s).

n_R : vitesse de rotation du rotor en (tr/s).

Ω_S : pulsation des courants inducteurs (rad/s).

Ω_R : pulsation des courants induits (rad/s).

(S est un nombre positif, sans unité et inférieur à 1. On l'exprime en %).

II-4-4 Principe de fonctionnement [17]

Les trois enroulements statoriques (trois enroulements identiques décalées de 120°) alimentés par un réseau triphasé équilibré créent dans l'entrefer un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation de synchronisme n_S. Les conducteurs du rotor sont soumis à ce champ tournant. Ils sont alors traversés par des courants de Foucault induits. D'après la loi de Lenz (les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur donnent naissance). Les enroulements du rotor étant en court-circuit, la circulation des courants sont alors possibles. Les forces de Laplace qui en résultent exercent des moments sur le rotor. Le rotor tourne alors à la fréquence de rotation n_R. De par son principe la fréquence de rotation du rotor est inférieure à la fréquence de synchronisme f_S : $f_R < f_S$

II-4-5 Modèle du moteur à induction [27]

Le moteur à induction est modélisé selon le schéma équivalent conventionnel (**Figure II.12**) :

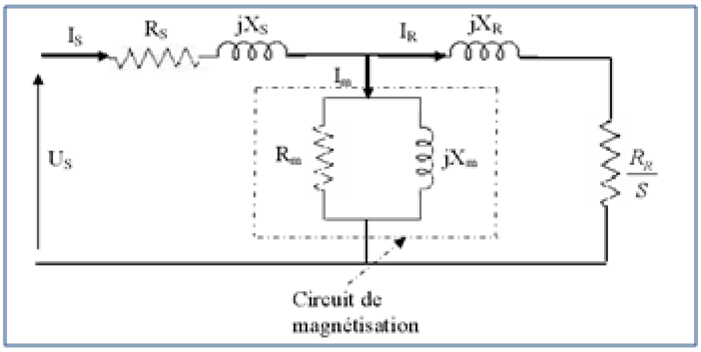


Figure II.12 : Schéma équivalent du moteur à induction.

I_S : courant primaire (A).

I_R : courant secondaire (A).

I_m : courant de magnétisation (A).

R_{St} : résistance d'une phase statorique du moteur (Ω).

R_R : résistance d'une phase rotorique (Ω).

R_m : résistance de magnétisation (Ω).

X_S : réactance de fuites d'une phase statorique (Ω).

X_R : réactance de fuites d'une phase rotorique (Ω).

X_m : réactance de magnétisation (Ω).

II-4-6 Equations fondamentales

Les forces induites dans les enroulements primaires et secondaires ont comme expressions :

$$\begin{cases} E_S = N_S.\ f_S.\ \Phi \\ E_R = N_R.\ f_R.\ \Phi \end{cases} \qquad (II.23)$$

Avec :

Φ : flux magnétique (Weber).

N_S et N_R : nombre de spires des enroulements primaire et secondaire.

f_S et f_R : fréquences des enroulements primaire et secondaire.

On en déduit :

$$\frac{E_S}{E_R} = \frac{1}{g} a_E \qquad (II.24)$$

Avec : $f_R = g\ f_S$

a_E : représente le rapport de transformation des tensions.

Les forces magnétomotrices est données par :

$$\begin{cases} F_S = N_S.\ I_S \\ F_R = N_R.\ I_R \end{cases} \qquad (II.25)$$

On a:

$$F_S = F_R \Longleftrightarrow N_S.\ I_S = N_R.\ I_R$$

On en déduit:

$$\frac{I_S}{I_R} = \frac{N_R}{N_S} = a_I \qquad (II.26)$$

a_I : représente le rapport de transformation des courants.

II-4-7 Bilan des puissances [17, 27]

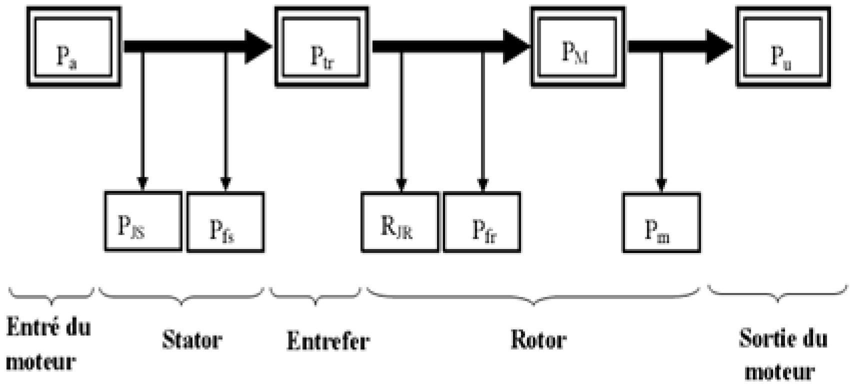


Figure II.13 : Bilan énergétique du moteur asynchrone.

- **Puissance électrique absorbée ou reçue par le stator** (puissance d'entrer du moteur)**:**

$$P_a = 3.I_S.V_S.\cos\theta_S \qquad \text{(II- 27)}$$

Où :
I_S : Courant primaire (A).
θ_S *:* L'angle entre I_S et V_S (représente le déphasage de I_S sur V_S).

- **Pertes par effet Joule au stator P_{JS}:**

Comme pour toute machine triphasée présentant une résistance R_{St} entre deux bornes de phases statoriques, il existe une puissance dissipée par effet Joule :

$$P_{JS} = 3.R_{St}.{I_S}^2 \qquad \text{(II.28)}$$

Où :

I_S : courant primaire (A).

R_{St} : résistance d'une phase statorique du moteur (Ω).

- **Pertes fer statoriques P_{fs} :**

Ces pertes sont indépendantes de charge.

- **Puissance transmise P_{tr} :**

C'est la puissance électromagnétique transmise du stator vers le rotor à travers l'entrefer. Elle est égale à la puissance absorbée moins les pertes statoriques.

$$P_{tr} = P_a - P_{JS} - P_{fs} \tag{II.29}$$

- **Moment du couple électromagnétique C_{em} :**

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du stator tournent à la vitesse ω_S, elle glisse sur le rotor qui tourne à la vitesse ω_R. L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant de moment T_{em} :

$$C_{em} = \frac{P_{tr}}{\omega_s} \tag{II.30}$$

Avec :

C_{em} (N.m) ; P_{tr} (W) et ω_S (rad/S).

- **Puissance mécanique totale P_M :**

Le couple électromagnétique de moment C_{em} entraîne le rotor à la vitesse ω_R. Il lui communique donc la puissance mécanique totale P_M :

$$P_M = C_{em} . \omega_R \tag{II.31}$$

Avec : $C_{em} = \frac{P_{tr}}{\omega_s}$

Donc : $P_M = P_{tr} \frac{\omega_R}{\omega_s} = P_{tr}(1 - S)$

$$P_M = (1 - S).\ P_{tr}$$

$$P_M = P_{tr} - P_{jr} \tag{II.32}$$

- **Pertes fer au rotor Pfr** : ces pertes sont négligeables.

- **Les pertes par effet Joule au rotor P_{JR}:**

C'est la puissance dissipée par effet Joule dans les conducteurs du rotor, son expression est :

$$P_{JR} = 3.R_R.{I_R}^2 \qquad \text{(II.33)}$$

Où :

I_R : courant secondaire (A).

R_R : résistance d'une phase rotorique (Ω).

Est comme les pertes fer du rotor sont négligeables, alors :

$$Pjr \approx S\ Ptr \qquad \text{(II.34)}$$

(P_{JR} est proportionnelle au glissement S).

- **Pertes collectives P_C :**

Ces pertes ne dépendent que de U, f et n. Comme ces grandeurs sont généralement constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques le sont aussi.

$$PC = Pfs + Pm \qquad \text{(II.35)}$$

- **Couple de perte C_P :**

Le couple de perte est une grandeur constante quelle que soit la vitesse et la charge de la machine :

$$C_P = \frac{P_C}{\omega_s} \qquad \text{(II.36)}$$

- **Puissance utile Pu :**

Les pertes mécaniques P_m se retranchent de la puissance mécanique P_M ; la puissance utile du moteur est donc égale à :

$$P_u = P_M - P_m \qquad \text{(II.37)}$$

- **Le moment Cu du couple utile :**

Le moment Cu du couple utile est défini par:

$$C_P = \frac{P_C}{\omega_s} \qquad \text{(II.38)}$$

- **Bilan complet :** $P_a = P_u + \sum \text{pertes}$

$$P_a = P_u + PJS + PJR + PC \qquad \text{(II.39}$$

- **Rendement :**

Il est défini par : $\eta = \frac{P_m}{P_a}$ (II.40)

η : est un nombre positif, sans unité, compris entre 0 et 1 et que l'on exprime en %.

La valeur maximale du rendement est : $\eta = 1 - S$.

II-4-8 Etude du couplage du moteur avec la pompe [17]

a- Etude à vide

A vide :

$T_U = 0 \Longrightarrow P_U = 0$ et $S = 0 \Longrightarrow R_{JR} = 0$.

S = 0 : le rotor tourne presque au synchronisme.

$P_{a0} = V_0.I_0 \cos \varphi_0$ et $P_{JS\,0} = RI_0^2 \approx 0$ (car I_0 est faible)

P_C à vide ≈ P_C en charge.

Bilan à vide : $\mathbf{P_{a0}} \approx P_C$

Un essai à vide permettra de déterminer les pertes collectives.

b- Etude en charge

- **Caractéristique mécanique**

Le moteur asynchrone triphasé démarre seul et il prend rapidement sa vitesse de régime, en charge comme à vide. Nous pouvons en conclure que ce moteur présente un couple de démarrage important.

Cette caractéristique mécanique montre que :

- La fréquence de rotation varie peu de l'essai à l'essai en charge.
- Le couple utile est élevé au démarrage, présente un maximum et il est proportionnel au glissement S dans la zone utile.

- **Point de fonctionnement du moteur en charge**

C'est le point d'intersection des caractéristiques C = f (n) du moteur et de la charge. Soit une charge de caractéristique mécanique Cr (n). En régime permanent, le moment du couple utile Cu est égal au moment du couple résistant Cr :

$$Cu = Cr$$

La charge impose un couple résistant de moment C_r sur l'arbre qui tourne à la vitesse ω. Le moteur doit fournir un couple utile de moment C_u, à l'équilibre $C_u = C_r$. Le point de fonctionnement du groupe moteur- charge (pompe) se situe à l'intersection des caractéristiques mécaniques $C_u = f(\omega)$ et $C_r = f(\omega)$ des deux machines.

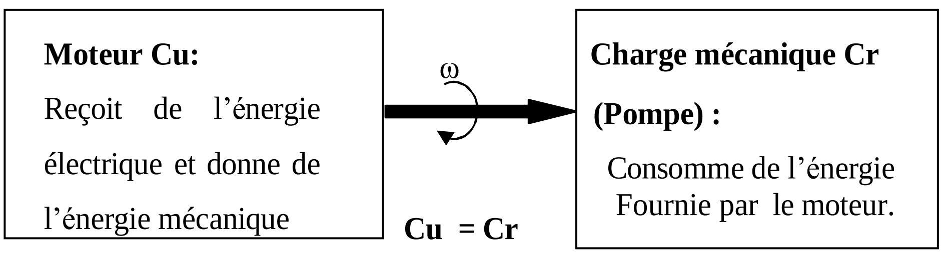


Figure II.14 : Couplage directe du moteur avec la pompe.

C_u = couple moteur [N.m]

C_r = couple résistant [N.m]

ω = vitesse angulaire [rad / s]

II-4-9 Méthode de calcul du point de fonctionnement [17]

Il en existe deux :

a- Méthode de résolution graphique

On trace les deux caractéristiques mécaniques (moteur, pompe) sur le même repère et on détermine les coordonnées du point de fonctionnement.

b- Méthode de résolution par le calcul

Si l'on connaît les relations mathématiques $C_u = f(\omega)$ et $C_r = f(\omega)$, on résout l'équation $C_u = C_r$.

II-5 Pompe centrifuge

Une pompe est une machine servant à véhiculer un fluide qui peut être de l'eau ou quelconque (pétrole, huile…) en l'aspirant pour le refouler à une certaine pression.

Une pompe est un système transférant de l'énergie à un liquide de façon à provoquer son écoulement dans une canalisation.

II-5-1 Classifications des pompes [29]

Selon les applications et les différentes sources d'eau (puits, forage, pompage de rivière, etc.) plusieurs types de pompes peuvent être utilisés dans les systèmes de pompage photovoltaïque.

Parmi ces pompes on trouve ; les turbos-pompes et les pompes volumétriques :

a- Turbopompe

Une turbopompe est un appareil dans lequel l'énergie transmise au liquide est une énergie principalement cinétique, qui lui est communiquée par l'intermédiaire d'un rotor, mais n'est pas en relation invariable avec le déplacement du rotor ; d'autre part, elle n'est pas distribuée uniformément dans tout le liquide.

Les différents types des turbopompes sont :

- **Pompes centrifuges**

Le mouvement du liquide est rigoureusement normal à l'axe, car il pénètre au centre de la roue et est projeté vers l'extérieur par l'action combinée de la force centrifuge et des aubes du rotor. La volute du corps transforme la vitesse acquise par le liquide en pression.

- **Pompes à hélice**

Dans ce type de pompe, le fluide est animé d'un mouvement parallèle à l'axe de la pompe, qui lui est communiqué par un impulseur en forme d'hélice ; la conversion partielle de l'énergie en pression se fait par l'intermédiaire d'un diffuseur à aubes ou par une augmentation de la section de passage.

- **Popes hélico- centrifuges**

Ce type de pompe a un impulseur qui est intermédiaire entre les deux types extrêmes, centrifuge et à hélice, le mouvement imprimé au liquide est donc à la fois centrifuge et axial.

b- Pompes volumétriques

Une pompe volumétrique est une pompe dans laquelle l'écoulement du liquide est en proportion constant avec le déplacement d'un organe mobile du corps de la pompe.
Les pompes volumétriques sont deux sortes, les pompes volumétriques alternatives et les pompes rotatives :

- **Les pompes volumétriques rotatives :** Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement.

- **Pompes à engrenages**

  Le liquide circule entre les dents et le corps de la pompe. Les engrenages peuvent être du type droit ou hélicoïdal, simple ou double.

- **Pompes à palettes**

  Dans ce type de pompe, un rotor, excentré par rapport au corps, est muni sur sa périphérie de volets ou de palettes, qui projetés par la force centrifuge contre le corps, assurent l'étanchéité entre corps et rotor. Le liquide, bloqué entre deux volets successifs, est entraîné et forcé vers l'extérieur au refoulement.

- **Pompes à vis**

  Dans les pompes à vis le rotor a la forme d'un cylindre sur le pourtour duquel se trouve une hélice. Le liquide est enfermé entre les hélices du corps et celle du rotor. Il progresse parallèlement à l'axe du cylindre.

- **Les pompes volumétriques alternatives**: la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif.

- **Pompes à piston**

Son principe est d'utiliser les variations de volume occasionné par le déplacement (Mouvement de va-et-vient) d'un piston dans un cylindre.

Ces déplacements alternativement dans un sens ou dans l'autre produisent des phases d'aspiration et de refoulement.

Quand le piston se déplace dans un sens le liquide est comprimé: il y a fermeture du clapet d'admission et ouverture du clapet de refoulement. Le fonctionnement est inverse lors de l'aspiration du liquide dans la pompe.

- **Pompes à membrane**

Dans la pompe à membrane, le mouvement alternatif est transmis à une membrane qui comprime un liquide contenu entre la membrane et le corps, muni lui aussi de clapets d'aspiration et de refoulement. L'intérêt de ce type de pompe est de permettre l'isolement total du liquide à pomper.

II-5-2 Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges [29]

a- Avantages

- Construction simple en général, une seule pièce en mouvement « le rotor ».
- Prix peu élevé.
- Encombrement réduit.
- Jeu assez large, donc facilité de manipuler des liquides contenant des solides en suspension.
- Entretien en général peu coûteux.
- Peu d'influence de l'usure ou de la corrosion sur les caractéristiques.
- Très large gamme de qualités matières suivant le service requis.
- Grand flexibilité d'utilisation.
- Ajustement automatique du débit à la pression.
- Puissance absorbée limitée, donc sans danger.

b- Inconvénients

- Limitation de la viscosité.
- En fait, la pompe centrifuge est limitée pratiquement à des viscosités de l'ordre de 100cSt (centistokes) et son rendement chute rapidement au-delà de cette valeur.
- Débit légèrement instable, dans les basses valeurs : difficulté de contrôler le débit.

Les pompes centrifuges présentent beaucoup d'avantages (simple, coût, faible maintenance et elle est disponible dans une large gamme de puissance).

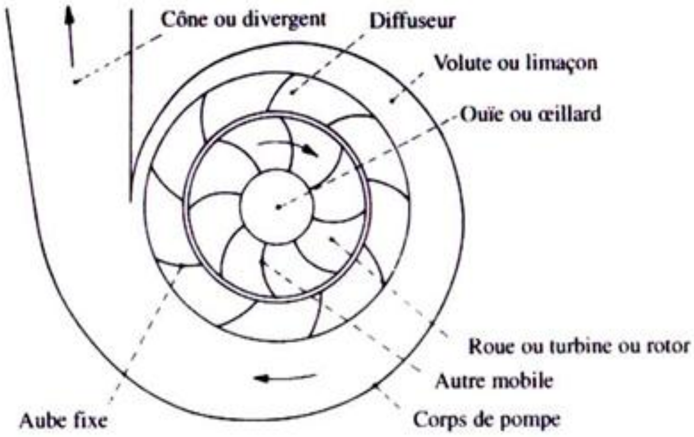


Figure II.15.a : Constitution d'une pompe centrifuge [30]

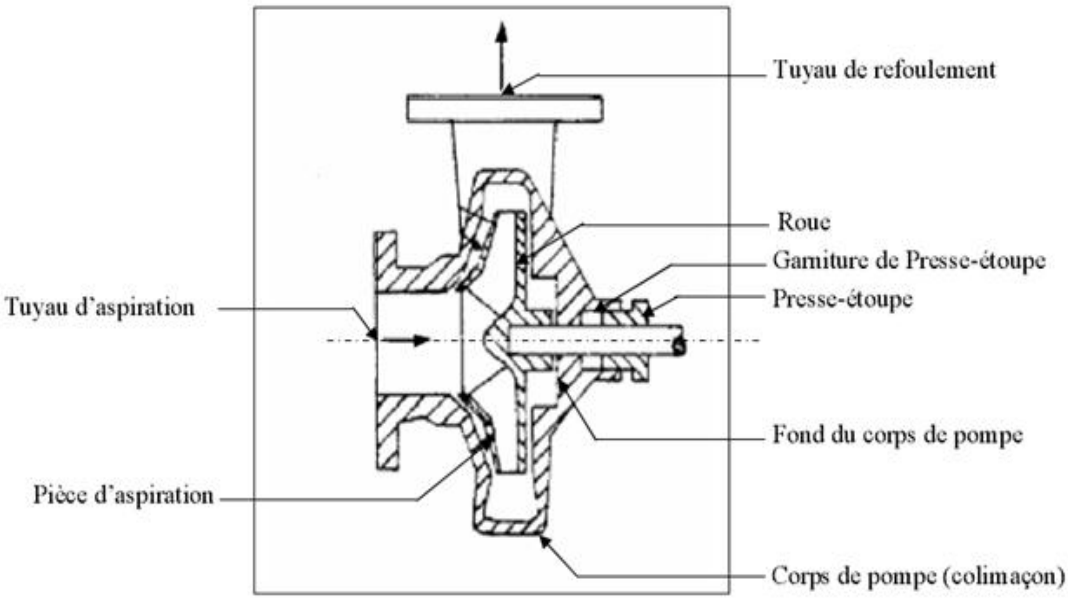


Figure II.15.b : couple d'une turbopompe [22]

II-5-3 Constitution d'une pompe centrifuge

La pompe centrifuge se compose essentiellement de [22]: (**Figure II.15.a/b**)

a- Un distributeur fixe : Le plus souvent réduit à une simple tubulaire profilée, qui donne au fluide une vitesse et une direction convenables, et conduisant ce dernier depuis la section d'entrée de la machine jusqu'à l'entrée de la roue .

Le distributeur est généralement constitue par un cône convergent qui permet de réaliser une meilleure disposition des filets liquides en améliorant le parallélisme et l'égalité des vitesses. Il est précédé par la canalisation d'aspiration.

b- Une roue ou impulseur : Placée sur l'arbre de la pompe appelée aussi rotor (mobile) qui est l'élément actif de la pompe, son rôle est de transformer l'énergie mécanique appliquée à l'arbre en énergie hydrodynamique (énergie de pression et énergie cinétique).

c- Un diffuseur fixe : Qui transforme l'énergie cinétique du fluide à la sortie de la roue en énergie de pression (énergie potentielle).

Pour pomper l'eau dans un forage ou alimenter un système d'irrigation, il faut disposer d'une forte pression de refoulement qui pourrait être provoquée par une pompe monocellulaire équipée d'une roue à grand diamètre.

Ce même mouvement peut être décomposé à chaque instant en deux mouvements distincts :

- Un mouvement d'entraînement caractérisé par la vitesse u.
- Un mouvement relatif (déplacement du liquide par rapport aux aubes), caractérisé par la vitesse w.

Ainsi la vitesse absolue **V** d'une particule liquide qui glisse entre deux aubes est égale à la somme vectorielle des deux vitesses précédentes :

$$\vec{V} = \vec{U} + \vec{W} \qquad \text{(II.41)}$$

III-5-4 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

Sous l'effet de la rotation de la roue, le liquide emmagasiné entre les aubes de la roue est projeté de la région axiale vers le diffuseur à cause de la force centrifuge ; de ce fait une dépression est créée à l'entrée de la pompe d'où l'effet d'aspiration du liquide et en même temps une compression à la sortie de la roue, cela suffit pour établir le mouvement continu de l'écoulement.

A la sortie de la roue, le liquide est récupéré dans une volute reliée à l'orifice de refoulement où l'énergie cinétique est transformée en énergie potentielle, on dispose ainsi à l'orifice de refoulement un débit sous une pression qui se traduit par une hauteur manometrique de refoulement [31].

II-5-5 Caractéristiques de la pompe centrifuge

a- Caractéristiques débit-vitesse:

Le débit de cette pompe est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois il faut une vitesse minimale à une Hm donnée pour obtenir un débit. [32]



Figure II.16 : Caractéristiques débit-vitesse d'une pompe centrifuge.

b- Caractéristiques couple-vitesse:

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit.

Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une Hm donnée pour obtenir un débit de départ non nul. [32, 33]

Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant Cr :

$$C_r = k_r \omega^2 + C_s \qquad \text{(II-42)}$$

Avec : k_r : coefficients de proportionnalité [(Nm/rad.s^{-1})^2]

C_s : le couple statique, très petite.

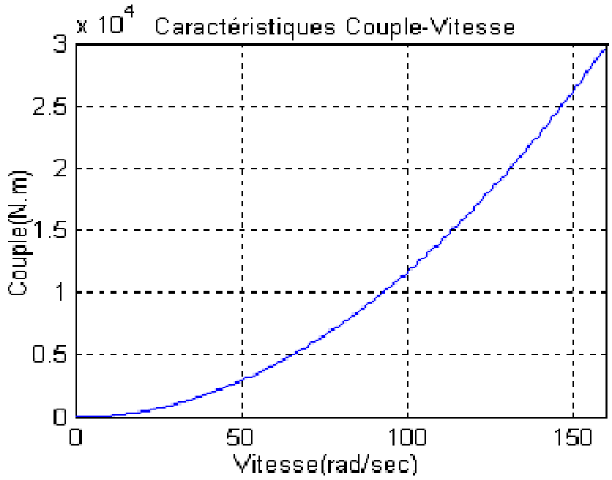


Figure II.17 : Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge.

L'équation de puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la vitesse est donnée par la relation suivante :

$$P_{méc} = k_r . \omega^3 \qquad \text{(II.43)}$$

c- Caractéristiques débit–hauteur :

La courbe débit-hauteur, exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction de débit.

Les constructeurs sont en mesure de fournir au client les courbes Q(HMT) maximale et minimale correspondant aux diamètres maximaux et minimaux possibles de la roue. [34]

Si la charge de moteur est une pompe émergée monocellulaire à roue radiale. Elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale HMT en fonction du débit Q.

En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de "PELEIDER-PETERMAN "

$$HMT = k_0.\omega^2 - k_1.\omega Q - k_2.Q^2 \qquad (II.44)$$

Avec : k_0, k_1, k_2 : des constants propre de la pompe donnée par le constricteur.

ω : La vitesse (rad/sec)

HMT: la hauteur (mètre)

Q : débit (l/min)

La courbe HMT(Q) comme indiquée sur la **Figure II.18,** est une parabole. Le point de rencontre de la courbe HMT(Q) avec l'axe des ordonnées est le point à débit nul. C'est le point à vanne fermée ou encore point de barbotage. [34]

Le point de fonctionnement de la pompe est le point d'intersection des deux courbes :

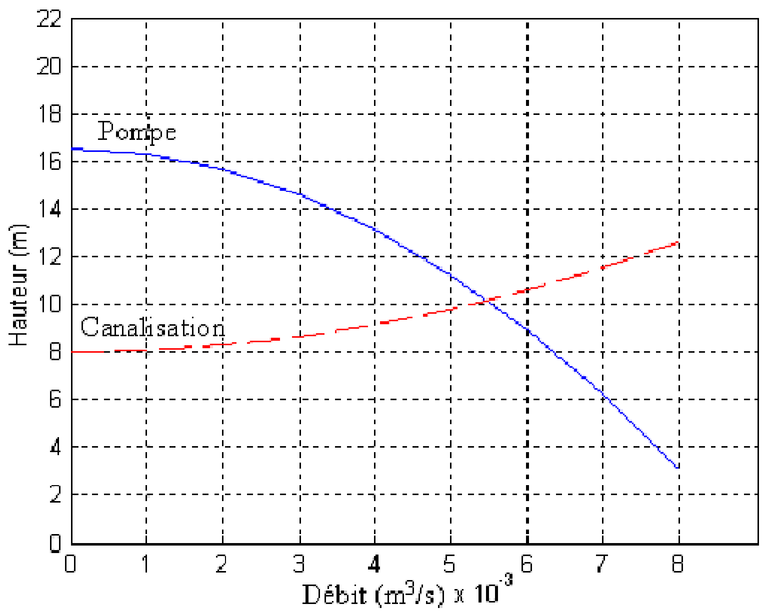


Figure II.18 : Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation.

d- Caractéristique de rendement :

Pour les groupes électropompes (pompe moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement, comme on peut tracer la courbe de rendement hydraulique en utilisant la formule : [17]

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_{ab}} \qquad (II.45)$$

Avec : $P_h = \rho.\, g.\, Q.\, HMT$

ρ : La masse volumique de l'eau étant de 1000kg/m^3.

g : Accélération de la pesanteur (9,81m^2 /s).

Q : Dédit d'eau.

Hm : Hauteur manométrique totale.

P_{ab} : Puissance fournie par le moteur.

Généralement le rendement maximal du groupe motopompe ne dépasse pas 72%.

Le schéma de **Figure II.19** présente les valeurs de rendement d'une pompe :

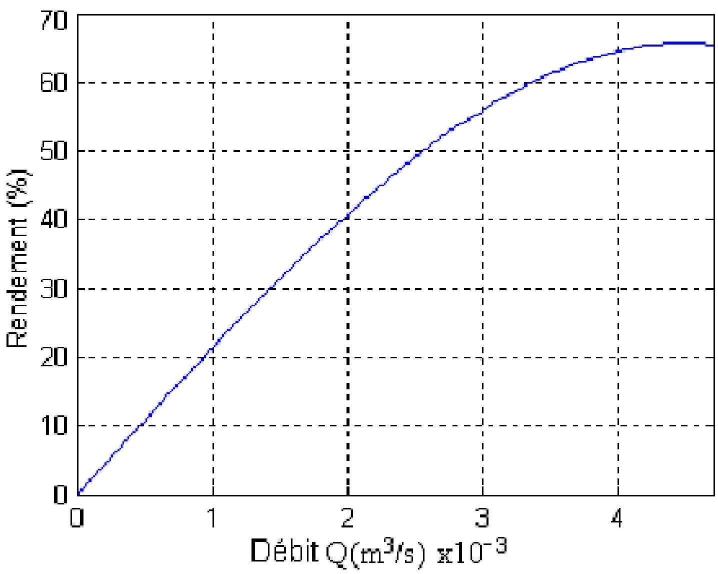


Figure II.19 : Caractéristiques de rendement de la pompe centrifuge.

II-5-6 Caractéristiques de la pompe centrifuge immergée

La pompe centrifuge immergée est caractérisée par les paramètres suivants :

- Son diamètre est soit de 4" (95 mm), soit de 6" (142 mm).
- Le corps de pompe est en acier inoxydable, les roues et les diffuseurs étant soit en acier inoxydable, soit en matériau synthétique. Ces matériaux présentent une très bonne résistance à l'abrasion.
- Le corps d'aspiration est protégé par une crépine contre les grosses impuretés supérieures à 3 mm).
- Un clapet anti-retour est intégré à la tête de pompe, qui est taraudée pour le raccordement au tuyau de refoulement. La lubrification est assurée par l'eau pompée.
- Le nombre d'étages est lié à la hauteur manométrique totale de refoulement.
- Le type d'aubage de chaque étage est lié à la puissance hydraulique à fournir pour la Hm nominale.
- Les rendements hydrauliques des pompes solaires sont élevés (utilisation de technologies de pointe). Ils sont de l'ordre de 55% à 60 % au point de fonctionnement nominal.
- La durée de vie peut être estimée entre 5 et 7 ans (elle est fortement liée à la qualité de l'eau).
- L'entretien courant consiste au nettoyage des étages (boue, sable, déchets si la pompe est installée dans un puits). La fréquence de celui-ci dépend de la qualité de l'eau pompée. [35]

II-6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents composants du système de pompage photovoltaïque et leurs modèles, afin de faciliter l'accès à la simulation du système.

Chapitre: III

" Simulation de la chaine de conversion PV sous MATLAB/SIMULINK "

III-1 Introduction

La simulation digitale sert afin de comprendre le comportement opérationnel de ces composants et les interactions entre eux. Depuis la simulation de la performance d'un système, on peut tracer toutes les étapes de la conversion d'énergie et identifier en détail les pertes à travers le système.

Comme la simulation sur ordinateur permet la variation d'une gamme de paramètres d'un système l'investigation comme fonction de ces paramètres, de caractéristiques opérationnelles, du procédé du projet de tel système.

Toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MATLAB 7.10.0.

III-2 L'outil Matlab/Simulink

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.[36]

La **Figure III.1** présente la bibliothèque de l'environnement SIMULINK.

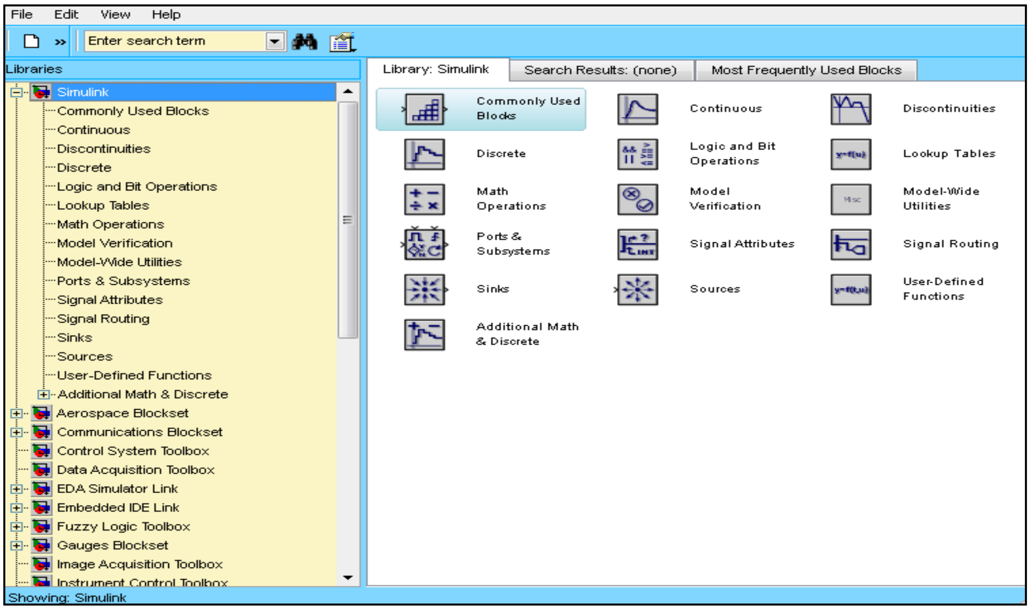


Figure III.1 Bibliothèque SIMULINK.

III-3 Le générateur photovoltaïque « G PV »

III-3-1 Modèle de la cellule PV

Sur la base du modèle mathématique de la cellule solaire développé dans le sous paragraphe **II.2** du chapitre 2, on obtient le bloc schématique de SIMULINK est montré sur **la Figure III.2**.

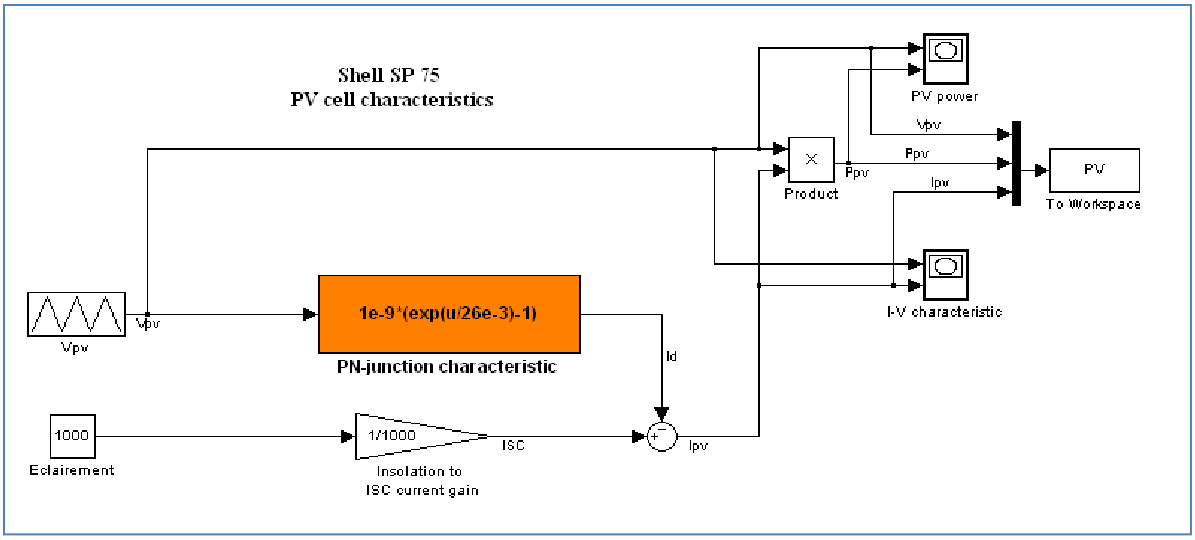


Figure III.2 Bloc de la cellule solaire dans SIMULINK.

Les résultats de simulation du bloc SIMULINK sont montrés sur la **Figure III.3.a** et **Figure III.3.b**, pour l'éclairement E=1000W/m^2 et de température 25°C.

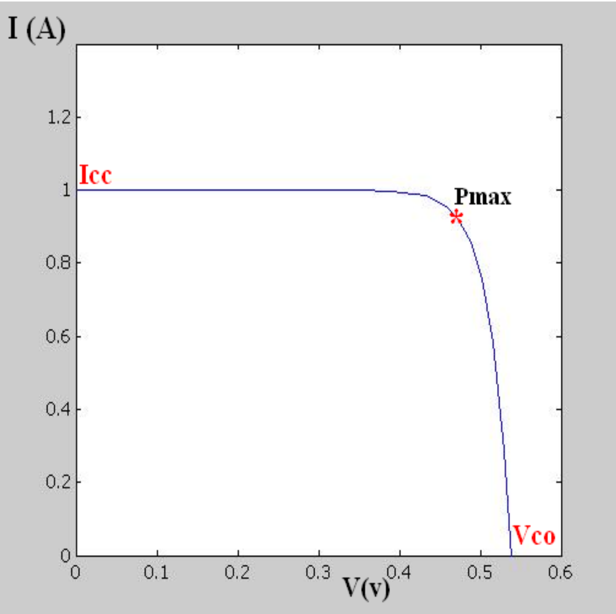


Figure III.3.a Caractéristique I=f(V) de la cellule.

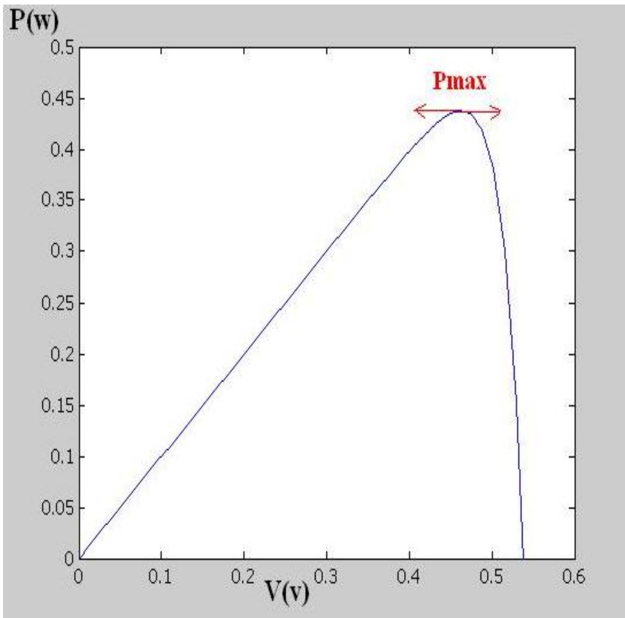


Figure III.3.b Caractéristique P=f(V) de la cellule.

D'après ces résultats de simulation, on peut constater que cette cellule à :

- Courant de court-circuit Icc = 1 A.
- Tension de circuit ouvert Vco= 0.54 v.
- Puissance maximale Pm = 0.44 w.

III-3-2 Caractérisation du module PV

Dans ce travail nous avons simulé le module **Shell SP75** qui comporte 36 cellules solaires de silicium monocristallin de 125.125mm connectées en série.

Le **Shell SP75** peut produire une puissance maximale de 75 watts à 17 volts.

Ceci nous a permis de déterminer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairement de 1000 W/m^2.

Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque Shell SP 75 en conditions de test standards sont représentées sur le **Tableau III.1.**

Grandeurs	Valeur
- Eclairement standard, E.	1000 W/m^2
- Température standard, T.	25^0 C
- Puissance crête maximale, P_m.	75 W
- Tension maximale, V_m.	17 V
- Courant maximal, I_m.	4.4 A
- Tension de circuit ouvert, V_{co}.	21.7 V
- Courant de court-circuit, I_{cc}.	4.8 A

Tableau III.1: Caractéristiques électriques du module Photovoltaïque Shell SP 75 en condition de test standard. [37]

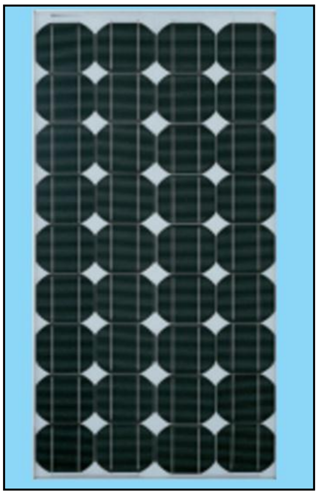


Figure III.4 : Module Shell SP75

La figure ci-dessous présente le block du module photovoltaïque dans l'environnement SIMULINK.

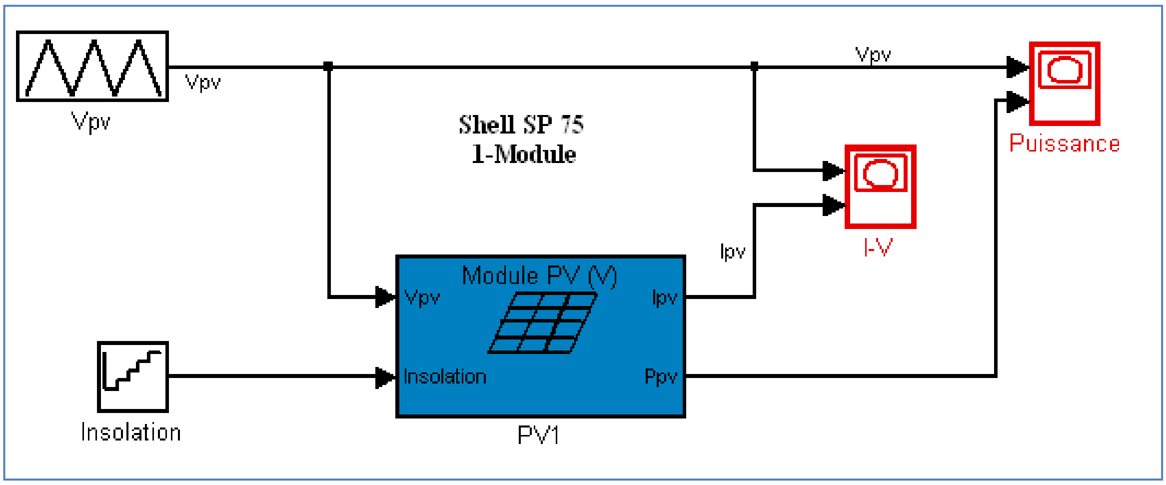


Figure III.5 : Block du module Shell SP 75 dans SIMULINK.

Les **Figure III.6.a** et **Figure III.6.b** nous montrent les caractéristiques électriques du module **Shell SP75** après son simulation avec MATALB/SIMULINK pour différentes valeurs d'éclairement et pour une température de 25°C.

Nous pouvons constater les caractéristiques suivantes pour ce module photovoltaïque :

I_{cc}=4.8 A , V_{co}=21.7V, V_m=17V, P_{max}=75W.

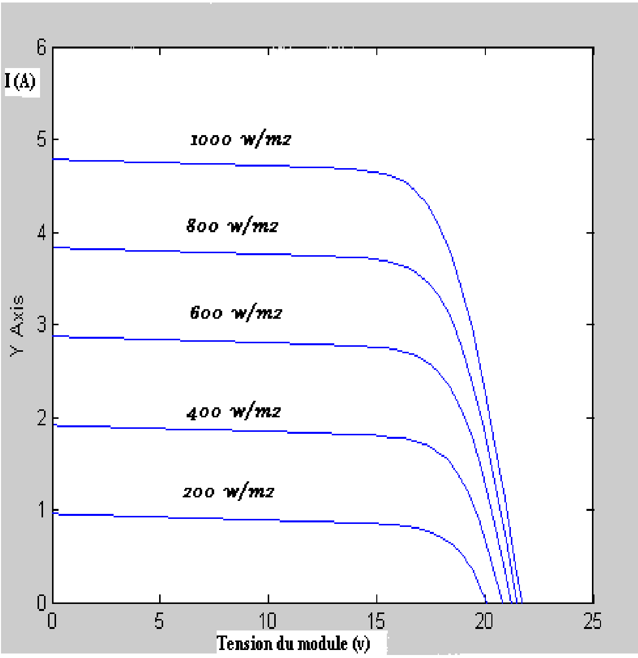


Figure III.6.a : Courbe I(V) du module.

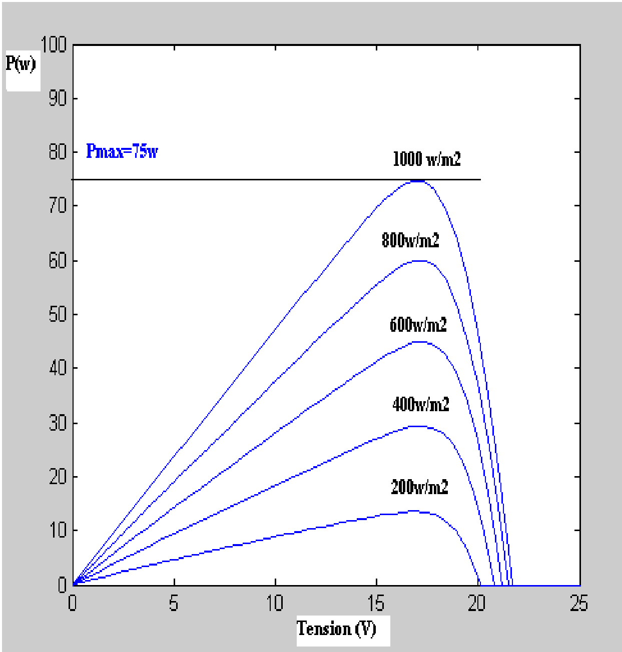


Figure III.6.b : Courbe P(V) du module.

III-4 Convertisseur DC-DC (Hacheur survolteur)

Le hacheur ou convertisseur continu-continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue.

Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur. Dans le cas contraire, il est dit survolteur. Le convertisseur dévolteur survolteur combine les propriétés des configurations de dévolteur et de survolteur. Il peut être employé pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue désirée de sortie. [3]

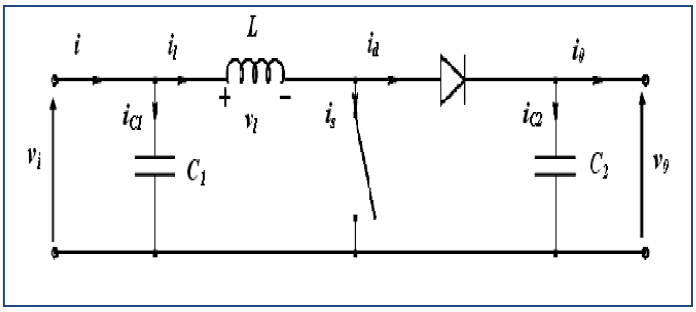


Figure III.7: Hacheur survolteur.

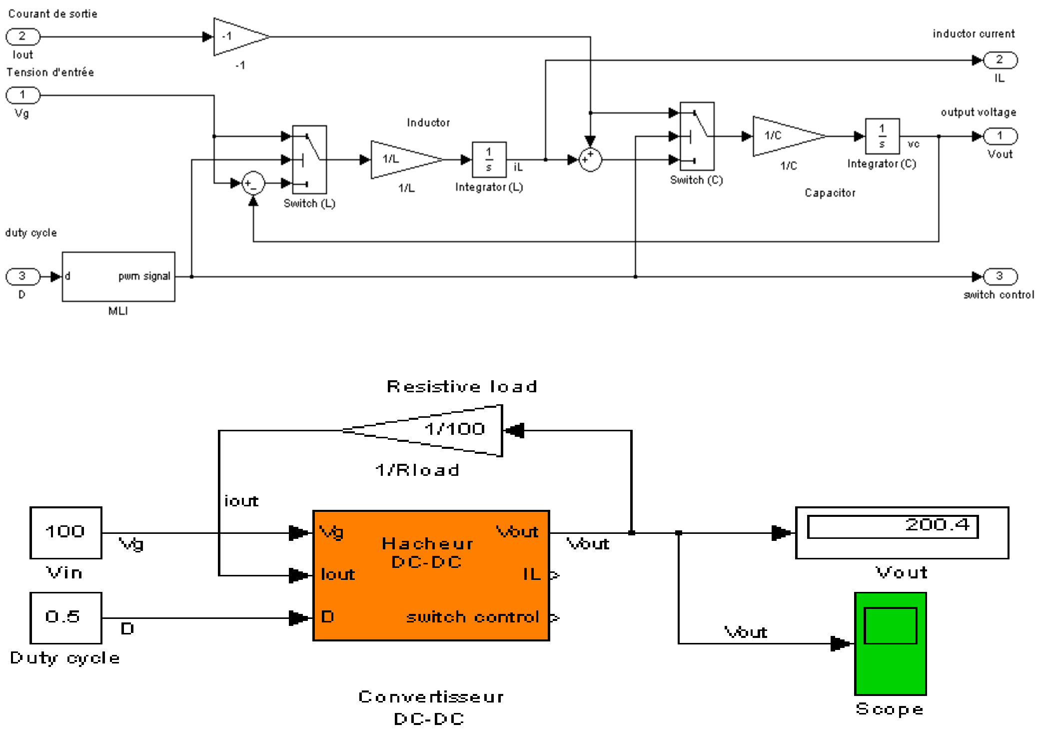


Figure III.8 Schéma SIMULINK d'hacheur.

Deux types de topologies des convertisseurs DC-DC, convertisseur buck et convertisseur « boost », qui sont les plus généralement employés par la majorité des concepteurs du suiveur de puissance maximum.

Dans le travail actuel, le convertisseur « boost » est choisi puisqu'il a d'excellentes caractéristiques telles que les possibilités des tensions élevées et de rendement important, la petite taille et le bas prix.

La **Figure III.8** confirme ça, pour une valeur de tension d'entrée Vin = 100 v, à la sortie de l'hacheur cette tension deviendra : Vout ≃ 205 v au début après elle se stabilise en environs Vout ≃ 200 v.

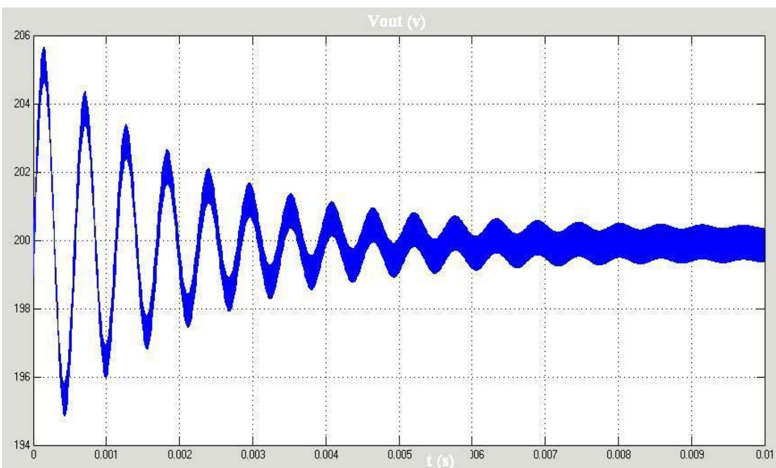


Figure III.9 La tension de sortie de l'hacheur pour une tension d'entrée V=100v.

III-5 Mise en œuvre de la commande de poursuite MPPT

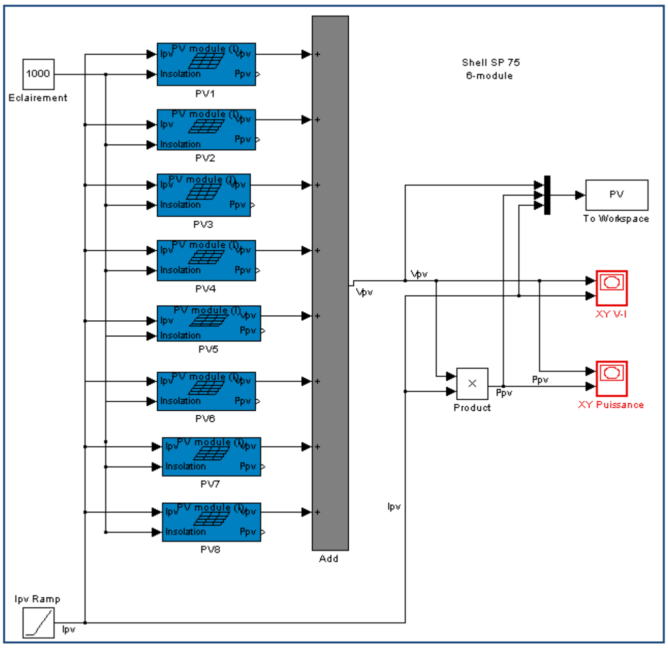
Pour avoir la meilleure connexion entre le « GPV » une source non linéaire et une charge pour produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé.

Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système.

Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique I-V avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale. [38]

III-5-1 Principe du MPPT

La méthode de perturbation et d'observation « P/O » est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque Vpv et Ipv respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température.



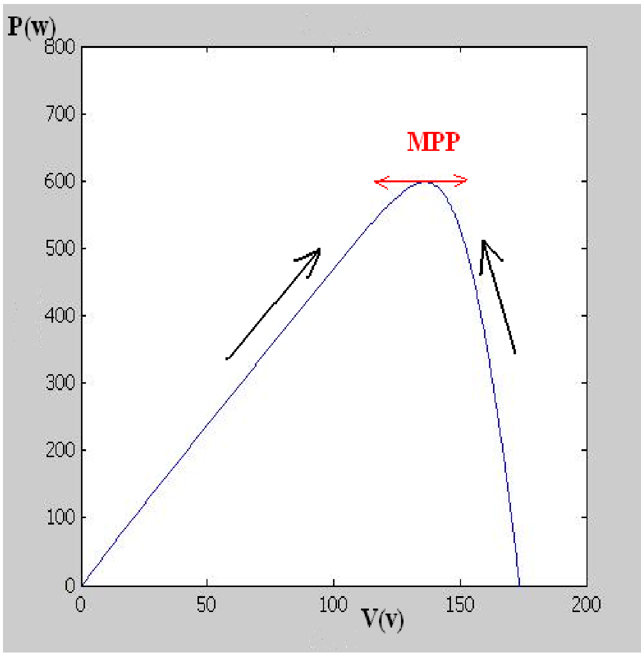


Figure III.10 : Block des 08 modules en SIMULINK. **Figure III.11 :** Courbe P(V) des 08 modules.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension Vpv et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV.

La **Figure III.11** représente l'algorithme de la méthode P&O.

Au début on fait définit les valeurs initiales : $I_{réf}$, Δ $I_{réf}$, P_{old}, à chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés afin de calculer P_{pv}.

Cette valeur de P_{pv} est comparée à la valeur P_{old} calculée au cycle précédent. Si la puissance de sortie a augmenté, $I_{réf}$ est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent et $I_{réf} = I_{réf} + \Delta I_{réf}$, $P_{old} = P_{pv}$.

Si la puissance de sortie a diminué, $I_{réf}$ est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent $I_{réf}$ est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT quand le point de puissance maximale est atteint, $I_{réf}$ oscille autour de la valeur optimale $I_{réf}$ - Δ $I_{réf}$ Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrémentation de la perturbation.

Si l'incrémentation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.

Le rendement de cette technique est d'environ 85%.

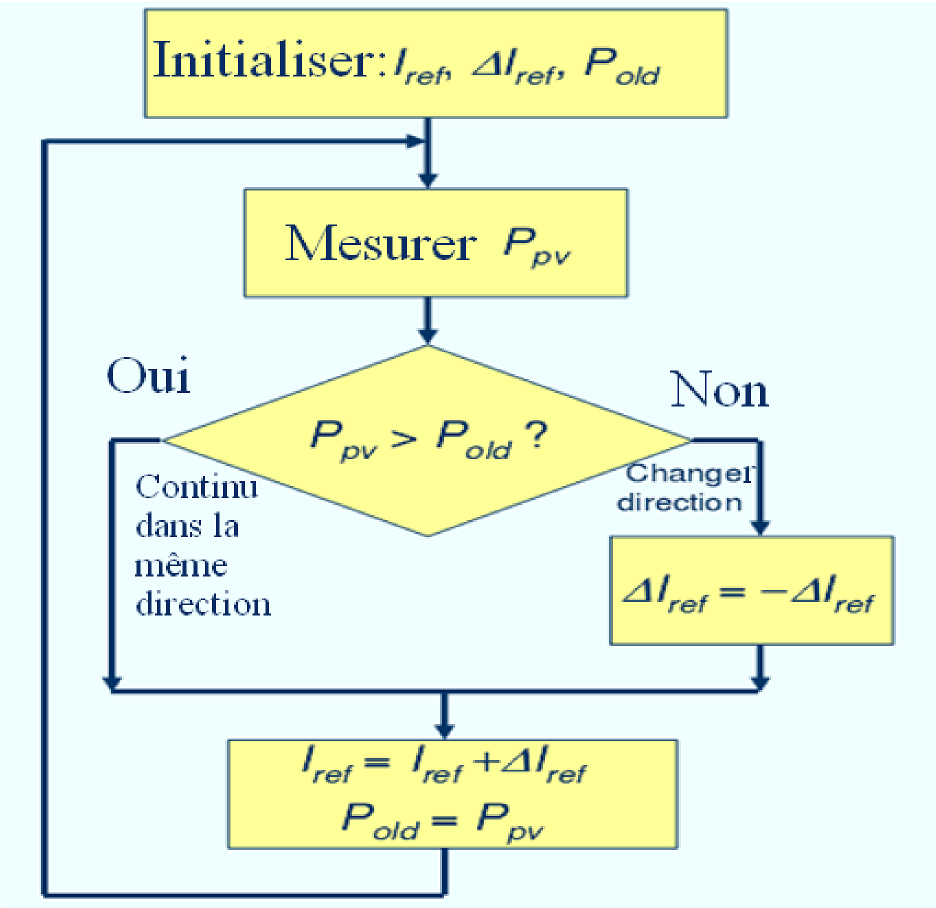


Figure III.12 Algorithme de MPPT « P/O » en MATLAB.

III-5-2 Introduction du MPPT dans la chaine PV

a- Bloc du système avec MPPT

La Figure III.12 illustre le bloc schématique de SIMULINK du générateur photovoltaïque et avec le cheminement de la commande de poursuite MPPT.

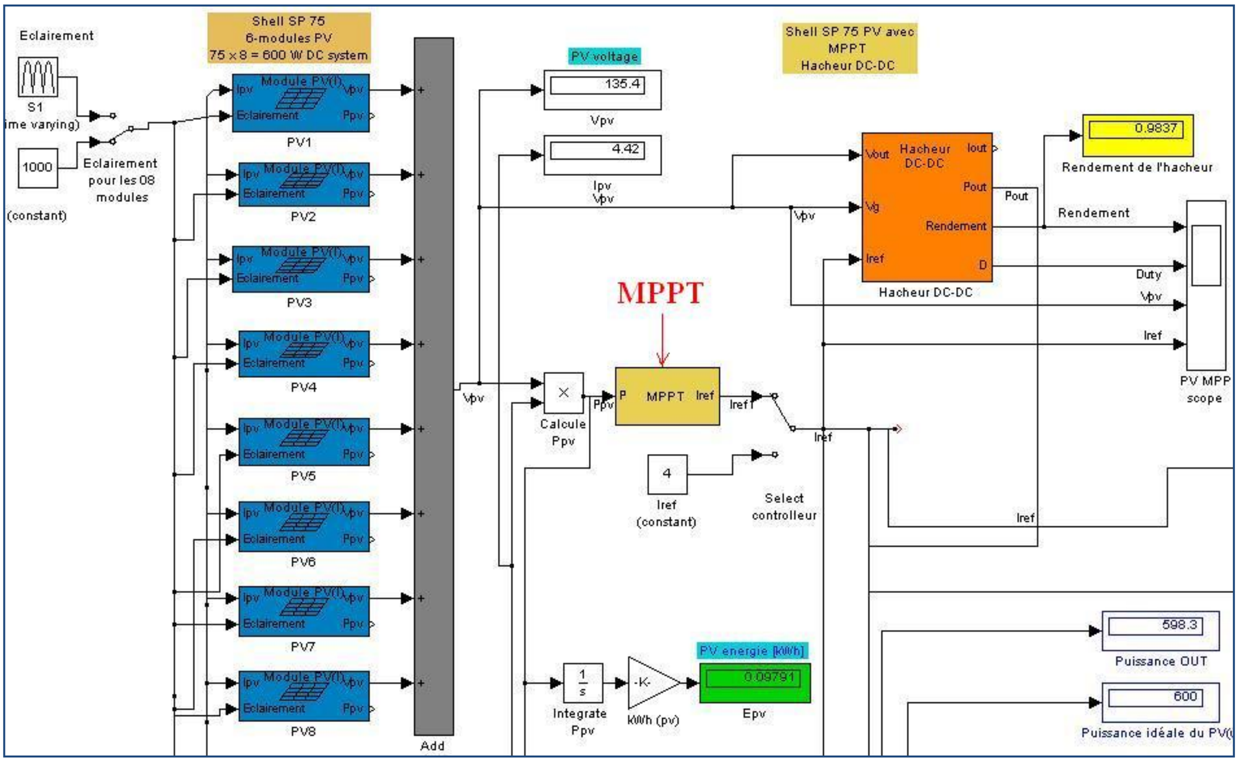
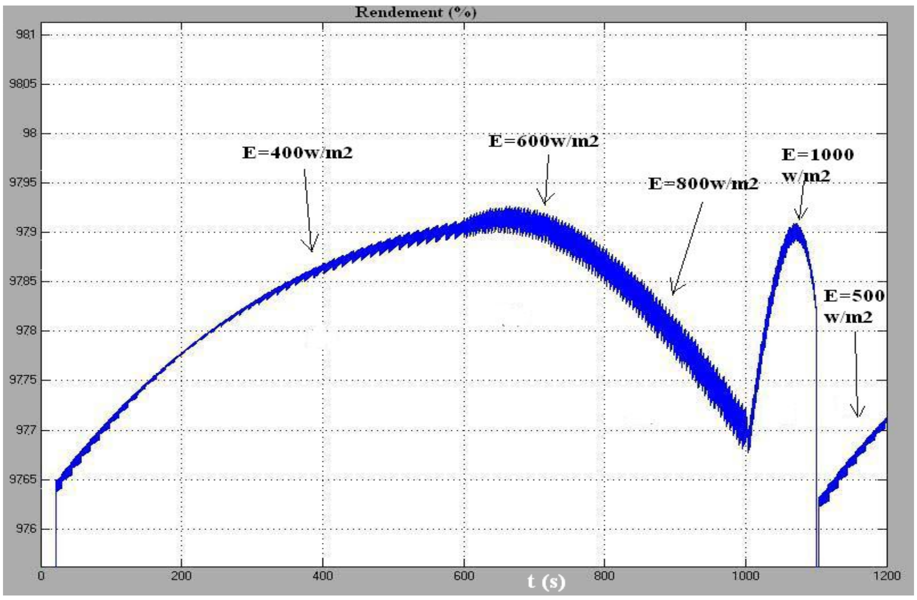
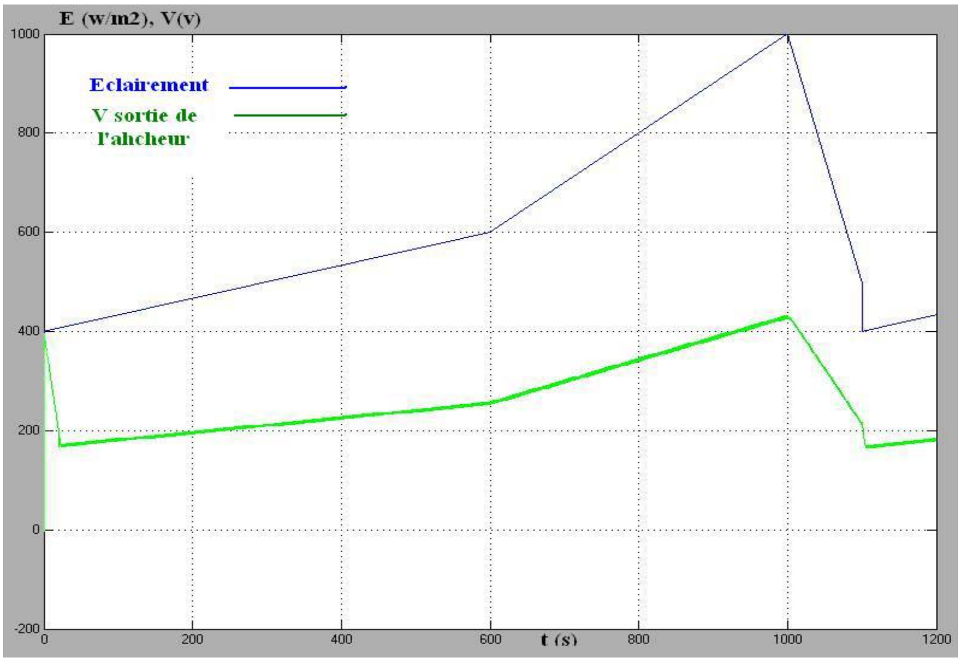


Figure III.13 : Bloc de MPPT en SIMULINK.

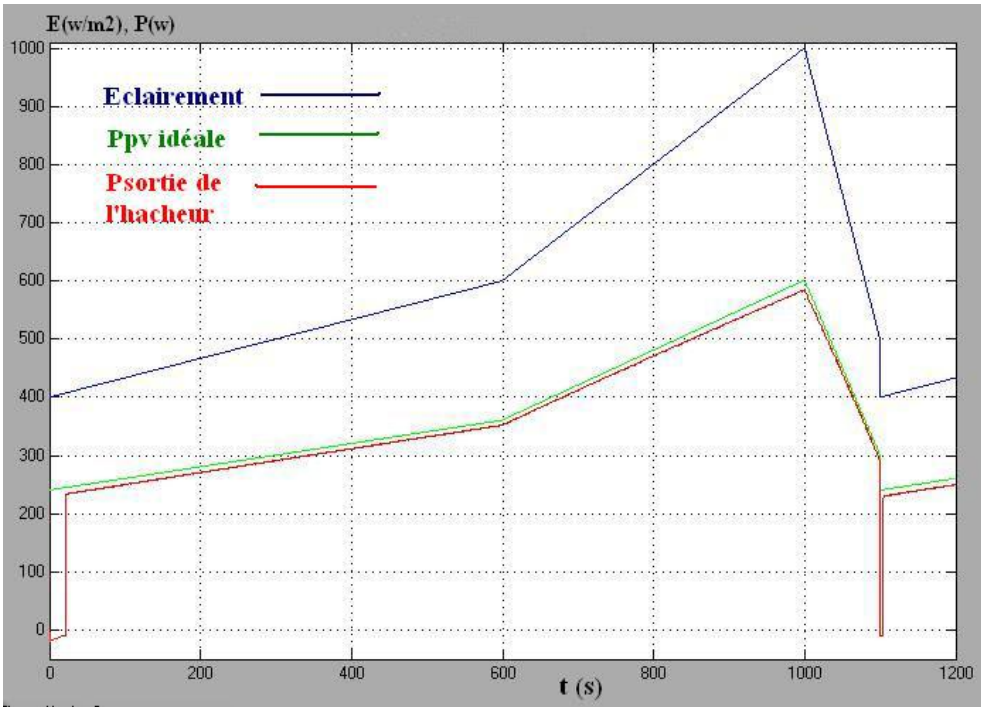
b- Résultats de simulation



(a) Rendement de l'hacheur survolteur (%).



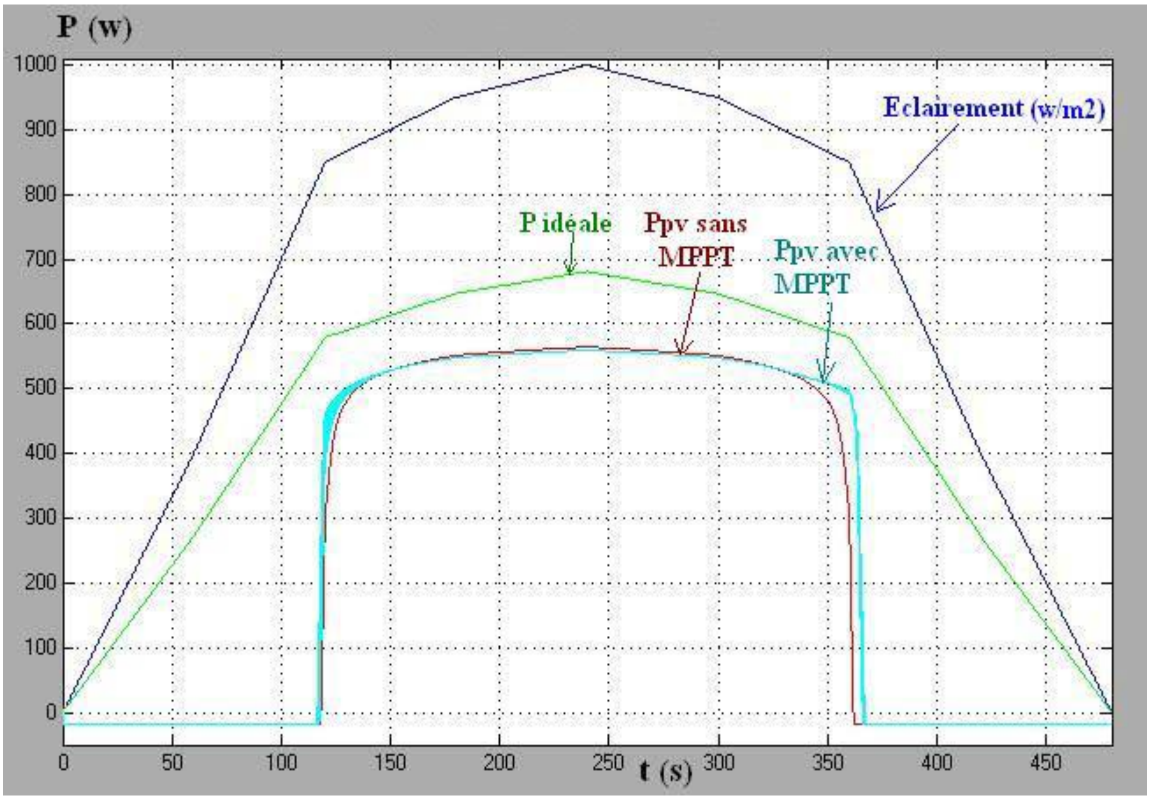
(b) La tension $\mathbf{V_{sortie}}$ de l'hacheur V(t).



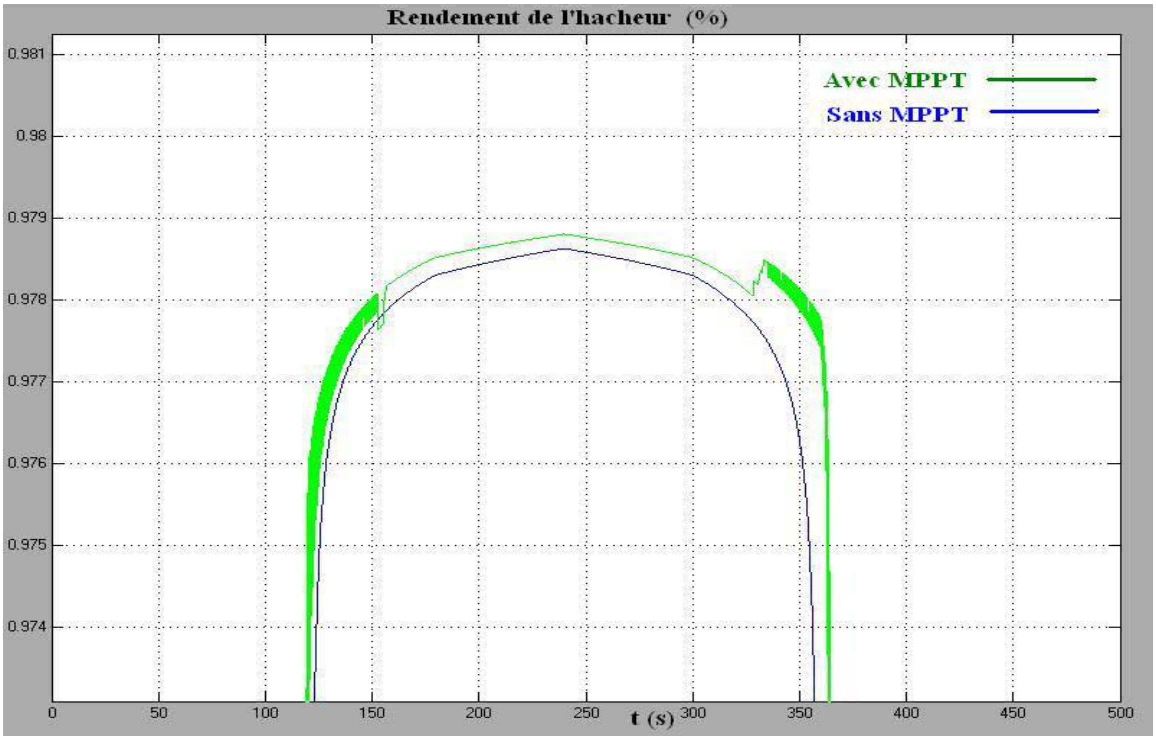
(c) Puissance sortie de l'hacheur.

Figure III.14 : Résultats de simulation avec la commande **MPPT**

On peut remarquer la performance de la commande MPPT pour différents éclairements, ceci se traduit par la puissance du GPV qui suit à chaque fois la puissance idéale de ce dernier, mais entre la zone d'éclairement E=1000w/m^2 et E=500w/m^2 il y a un abaissement brusque de l'éclairement, alors la puissance du GPV tend vers zéro mais après des secondes elle se converge de nouveau vers la puissance idéale, ceci est un inconvénient de la commande MPPT.



(a) Puissance du GPV.



(b) Rendement de l'hacheur pour différents éclairements.

Figure III.15 : Comparaison entre le système avec et sans **MPPT**.

III-6 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur et commande MPPT est présentée. Les modèles SIMULINK sont construits sur la base des modèles mathématiques.

La simulation du système photovoltaïque nous a permis de vérifier le bon fondement des relations et des modèles mathématiques de chaque partie de ce système. Ainsi nous avons pu faire simuler les modules solaires, avoir leurs caractéristiques et voire la performance de la commande MPPT, qui force le système PV à travailler autour de sa puissance maximale.

Chapitre IV :
" Stratégies de commande d'un système de pompage PV "

IV-1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu sur la modélisation des machines asynchrones triphasées sous forme d'équations d'état en vue de leur commande. Nous rappellerons brièvement le modèle du convertisseur statique en présentant une commande approchée des interrupteurs de l'onduleur, après nous traiterons la commande vectorielle par flux orienté, et nous clôturons par des tests de simulation pour valider nos modèles.

IV-2 Modèle de la machine asynchrone triphasée [39]

La machine asynchrone représentée par **la figure IV.1** se compose:

- D'un circuit statorique fixe comportant trois phases identiques décalées entre elles de 120^0
- D'un circuit rotorique mobile comportant trois phases identiques en court circuits décalées entre elles de 120^0

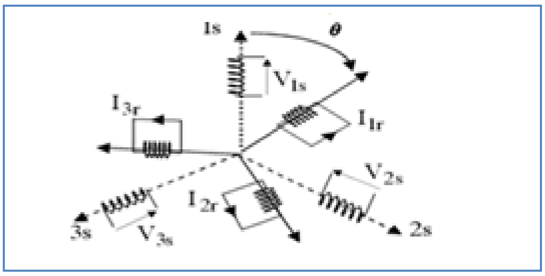


Figure IV.1 : Représentation symbolique de la MAS.

IV-3 Equations électriques de la machine asynchrone dans le repère triphasé

Les équations régissant le fonctionnement électrique de la machine asynchrone (MAS) peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} \mathbf{U_s} = |R_s|\mathbf{I_s} + \dfrac{d\boldsymbol{\varphi}_s}{dt} \\ \mathbf{0} = |R_r|\mathbf{I_r} + \dfrac{d\boldsymbol{\varphi}_r}{dt} \end{cases} \quad \text{(IV.1)}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varphi}_s = |L_s|\mathbf{I_s} + |M_{sr}|\mathbf{I_r} \\ \boldsymbol{\varphi}_r = |L_r|\mathbf{I_r} + |M_{rs}|\mathbf{I_s} \end{cases} \quad \text{(IV.2)}$$

avec

$\mathbf{U_s} = (V_{1s}\ V_{2s}\ V_{3s})^T$ $\quad \mathbf{0} = (V_{1r}\ V_{2r}\ V_{3r})^T$

$\mathbf{I_s} = (I_{1s}\ I_{2s}\ I_{3s})^T$ $\quad \mathbf{I_r} = (I_{1r}\ I_{2r}\ I_{3r})^T$

$\boldsymbol{\varphi}_s = (\phi_{1s}\ \phi_{2s}\ \phi_{3s})^T$ $\quad \boldsymbol{\varphi}_r = (\phi_{1r}\ \phi_{2r}\ \phi_{3r})^T$

$$|R_s| = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; |R_r| = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} ; |L_s| = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} ; |L_r| = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$|M_{sr}|^T = |M_{rs}| = M' \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix}$$

Où $\mathbf{l_s}$ ($\mathbf{l_r}$) est l'inductance propre d'une phase statorique (rotorique), $\mathbf{m_s}$ ($\mathbf{m_r}$) est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques (rotoriques) et **M'**est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

IV-4 Transformation de Park

La transformation de Park est une transformation du repère triphasé fixe par rapport au stator dans un repère biphasé. Cette transformation permet de réduire la complexité du système.

La position du repère peut être fixée par rapport aux trois référentiels :

- Champ tournant.
- Stator.
- Rotor.

La transformation de Park est obtenue à partir d'une matrice unique (2x3) donnée par:

$$T(\theta) = k \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad \text{(IV.3)}$$

Où k est une constante qui peut prendre la valeur 2/3 pour la transformation avec non conservation de puissance ou la valeur $\sqrt{2/3}$ pour la transformation avec conservation de puissance.

Nous négligeons la composante homopolaire car nous considérons que le système est équilibré.

Le changement de variables relatif aux courants, aux tensions et aux flux est défini par la transformation :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}_y = \mathsf{T}(\theta)_y \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_y \qquad y = s \ ou \ r \quad \text{(s: stator , r: rotor)} \tag{IV.4}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}_y$$: peut être tension ou courant ou flux

La transformation inverse de Park a pour expression

$$[\mathsf{T}(\theta)_y]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & -\sin\theta_y \\ \cos(\theta_y - 2\pi/3) & -\sin(\theta_y - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_y - 4\pi/3) & -\sin(\theta_y - 4\pi/3) \end{bmatrix} \tag{IV.5}$$

D'où la transformation inverse des variables

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_y = [\mathsf{T}(\theta)_y]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}_y \tag{IV.6}$$

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et l'axe du repère de Park (d,q)

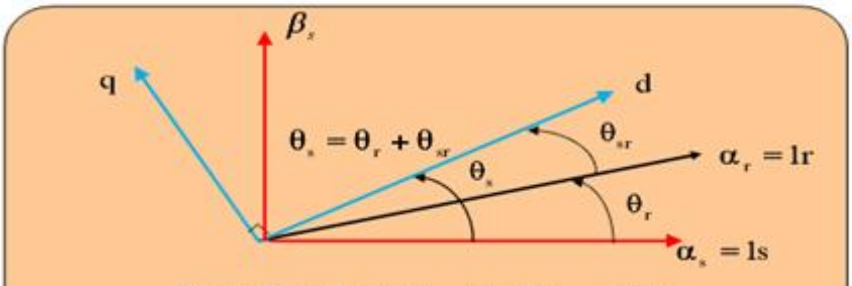


Figure IV 2 *Repères* $(\alpha,\beta)_y$, (d,q)

Les équations (IV.1) et (IV.2) donnent alors lieu au système suivant

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} = 0 \\ V_{qr} = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{sr} \\ \omega_{sr} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} \tag{IV.7}$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \phi_{qs} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \tag{IV.8}$$

Où $L_s = l_s - m_s$; $L_r = l_r - m_r$; $M = \frac{3}{2} M'$; $\omega_{sr} = \omega_s - \omega_r$

En notation complexe, le système d'équation (IV.7) dans le référentiel du champ tournant s'écrit:

$$\begin{cases} \overline{V}_s = R_s \overline{I}_s + \dfrac{d}{dt}\overline{\phi}_s + j\omega_s \phi_r \\ 0 = \overline{V}_r = R_r \overline{I}_r + \dfrac{d}{dt}\overline{\phi}_r + j(\omega_s - \omega_r)\phi_r \end{cases} \qquad \begin{cases} \overline{\phi}_s = L_s \overline{I}_s + M\overline{I}_r \\ \overline{\phi}_r = L_r \overline{I}_r + M\overline{I}_s \end{cases} \qquad (IV.9)$$

Où

$$\overline{V}_s = V_{ds} + jV_{qs} \qquad \overline{I}_s = I_{ds} + jI_{qs} \qquad \overline{\phi}_s = \phi_{ds} + j\phi_{qs} \qquad \overline{\phi}_r = \phi_{dr} + j\phi_{qr}$$

Il existe plusieurs choix de l'orientation du repère de **Park** qui dépendent des objectifs de l'application voulue:

a- Axes solidaires du champ tournant : Ce choix permet d'avoir une pulsation de glissement et s'adapte parfaitement à « *la commande vectorielle par orientation du flux rotorique* ».

b- Axes liés au stator: c'est le repère naturel ou stationnaire de la machine asynchrone.

Ce choix permet de simplifier la transformation de **Park** en celle de **Clark** dans le cas de non conservation de puissance ou celle de **Concordia** dans le cas contraire **(Annexe 1)**. C'est ce dernier choix qui est utilisé pour la conception de « *la commande directe du couple* ». Ces deux référentiels sont les plus utilisés dans la commande de la machine asynchrone.

IV-5 Stratégie de commande par MLI vectorielle [39]

Il existe plusieurs stratégies de commande **MLI**, on va utiliser la commande MLI vectorielle car elle peut permettre l'alimentation de la machine asynchrone avec une plus grande tension et avec moins de distorsion harmonique.

IV-5-1 Principe de la commande par MLI vectorielle

La modulation de largeur d'impulsion vectorielle utilise un algorithme numérique afin d'obtenir une séquence de commande des interrupteurs de l'onduleur permettant de générer un vecteur tension de sortie qui s'approche le mieux possible du vecteur tension de référence.

Cette technique de MLI suit les principes suivants :

- Echantillonnage du signal de référence à intervalles réguliers T appelé période de modulation.
- Réalisation dans chaque période de modulation, d'une impulsion de largeur T centrée sur la période, et dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence au milieu de la période de modulation (MLI symétrique).
- Uniformisation des états de tous les interrupteurs d'un même demi–pont au centre et aux deux extrémités de la période.

Cette modulation est conduite en synchronisme sur les trois phases. Les trois tensions sinusoïdales désirées à la sortie sont représentées par un seul vecteur appelé vecteur tension de référence.

On approxime au mieux ce vecteur pendant chaque intervalle de modulation en agissant sur la commande des trois jeux d'interrupteurs complémentaires K_1 et K_1', K_2 et K_2', K_3 et K_3' représentés par **la Figure IV.3**

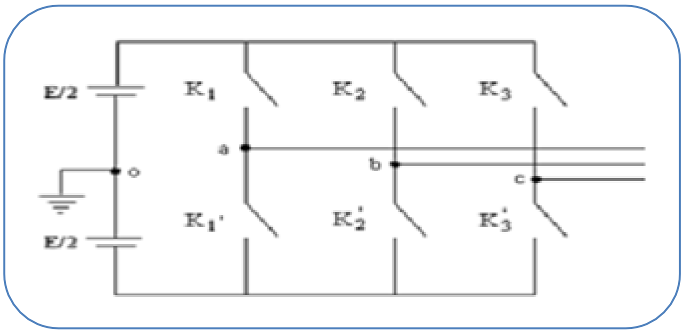


Figure IV.3 : Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Une analyse combinatoire de tous les états possibles des interrupteurs constituants le convertisseur donne huit (2^3) combinaisons possibles dont six états actifs non nuls et deux restants des états de commutation nuls.

Les vecteurs de tensions sont représentés par la relation suivante :

$$\vec{V}_i = \begin{cases} \sqrt{2/3}\,U_{dc}\,e^{j(i-1)\frac{\pi}{3}} & i = 1,\ldots,6 \\ 0 & i = 0,7 \end{cases} \qquad \text{(IV. 10)}$$

Les extrémités de ces six vecteurs définissant les sommets d'un hexagone régulier puisque deux vecteurs successifs font entre eux un angle de $\pi/3$, **Figure IV.4**.

Chacun des couples de vecteurs V_i et V_{i+1} (i=1..6) définissent les limites d'un des six secteurs de l'hexagone (à noter que dans le secteur 6 la notation V_{i+1} correspond au vecteur V_1).

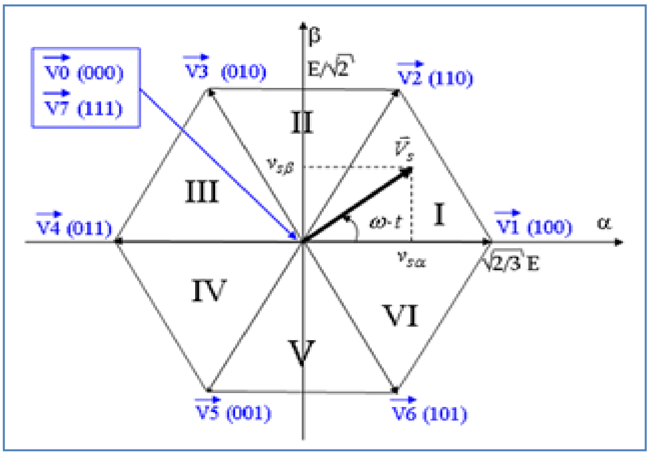


Figure IV.4 : Représentation du polygone de commutation.

IV-5-2 Vecteurs tensions de référence

$$\begin{cases} V_{sa} = r \cdot U_{dc}/2 \cdot \cos \omega t \\ V_{sb} = r \cdot U_{dc}/2 \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V_{sc} = r \cdot U_{dc}/2 \cdot \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (IV.11)$$

La transformation de Concordia donne :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = r \cdot \sqrt{3/2}.U_{dc}/2 \cdot \cos \omega t \\ V_{s\beta} = r \cdot \sqrt{3/2}.U_{dc}/2 \cdot \sin \omega t \end{cases} \quad (IV.12)$$

On peut définir un vecteur $\vec{V}_s$ dont les cordonnées sont les composantes de Concordia $\vec{V}_{s\alpha}$, $\vec{V}_{s\beta}$ du système triphasé des tensions : $\vec{V}_{sa}$, $\vec{V}_{sb}$ et $\vec{V}_{sc}$ qu'on désire obtenir en sortie.

Le schéma suivant résume la méthode de calcul de la MLI vectorielle :

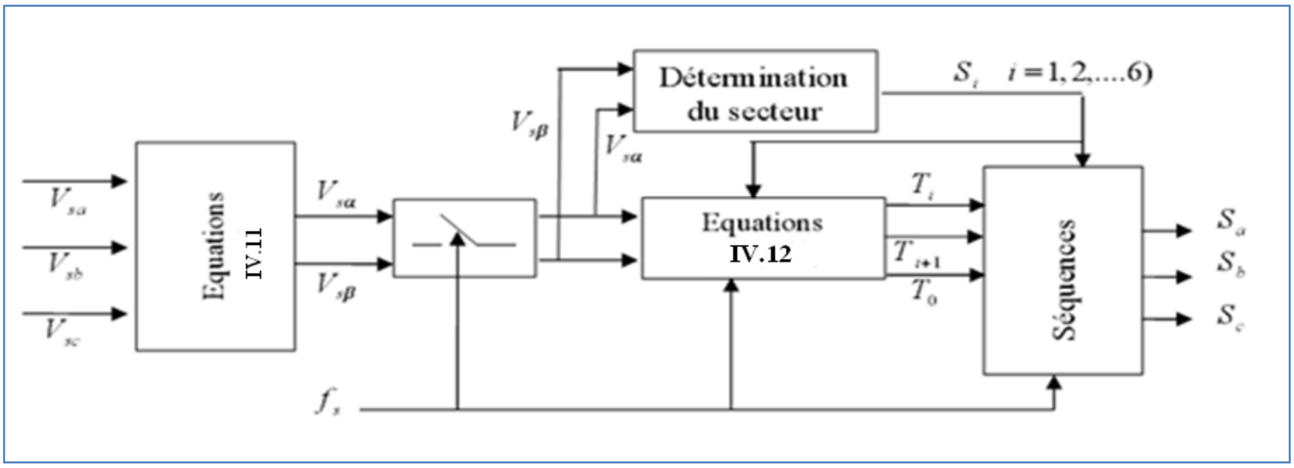


Figure IV.5 : Schéma de principe de la MLI vectorielle.

IV-6 Simulation de la commande MLI vectorielle:

IV-6-1 Modèle de simulation

La Figure IV.6 présente le modèle de la commande MLI des interrupteurs (S_1, S_2... S_6) pour un onduleur triphasé et les vecteurs tensions de référence.

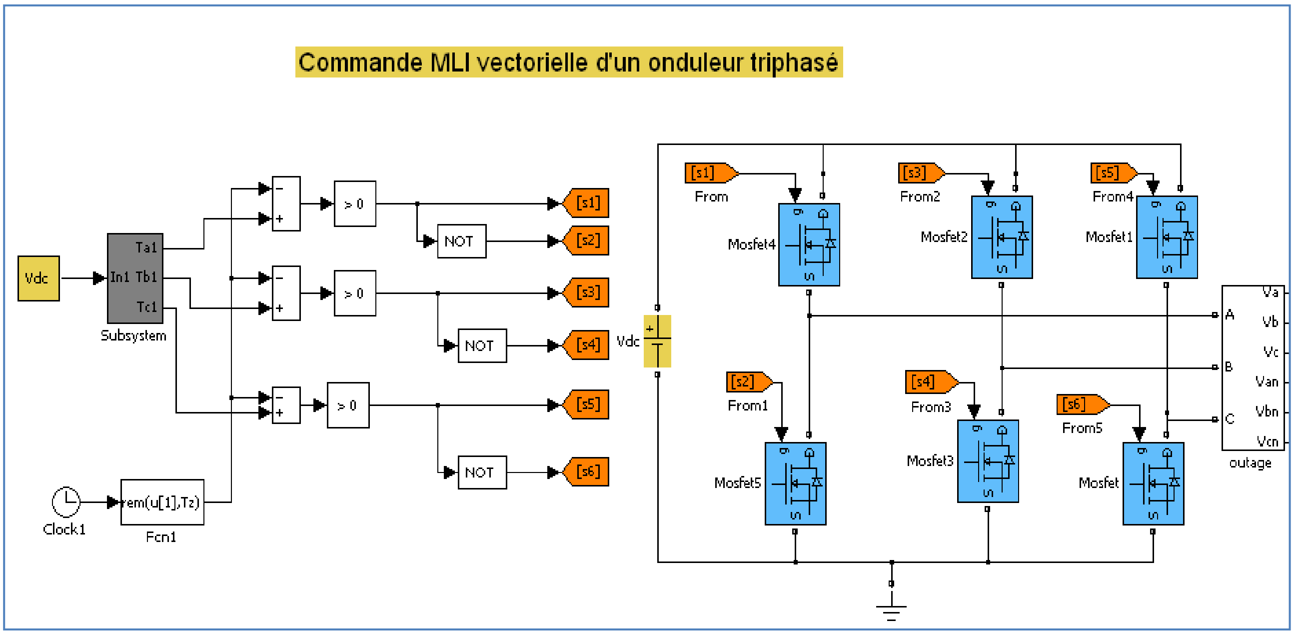


Figure IV.6 : Bloc SIMULINK de MLI vectorielle.

IV-6-2 Résultats de simulation

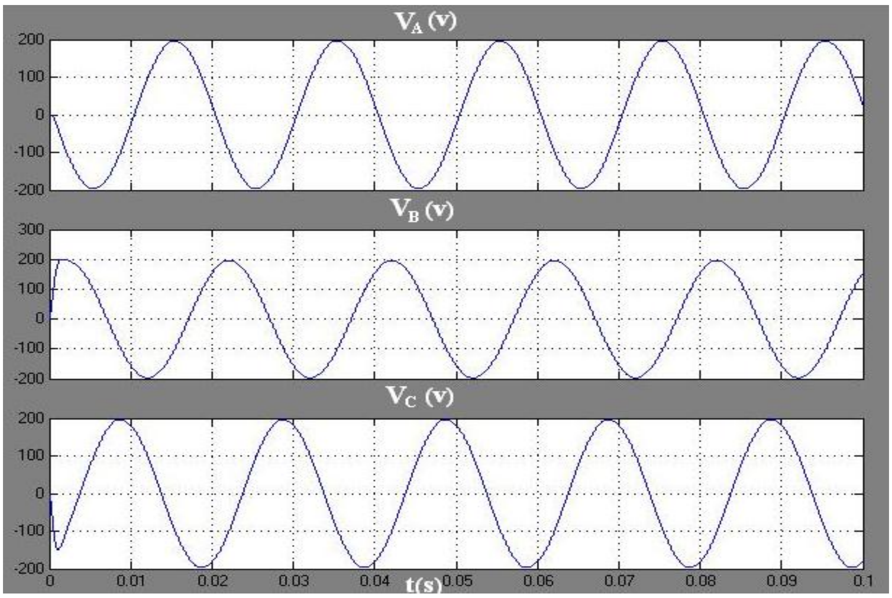


Figure IV.7 : Les tensions filtrées : V_A , V_B , V_C.

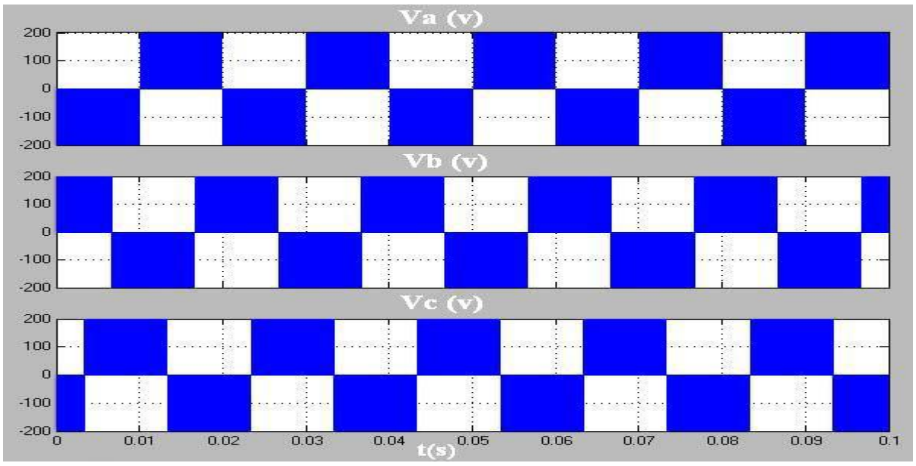


Figure IV.8 : Les tensions de lignes : V_a , V_b, V_c.

Réponses de l'association MAS-onduleur à MLI-Vectorielle :

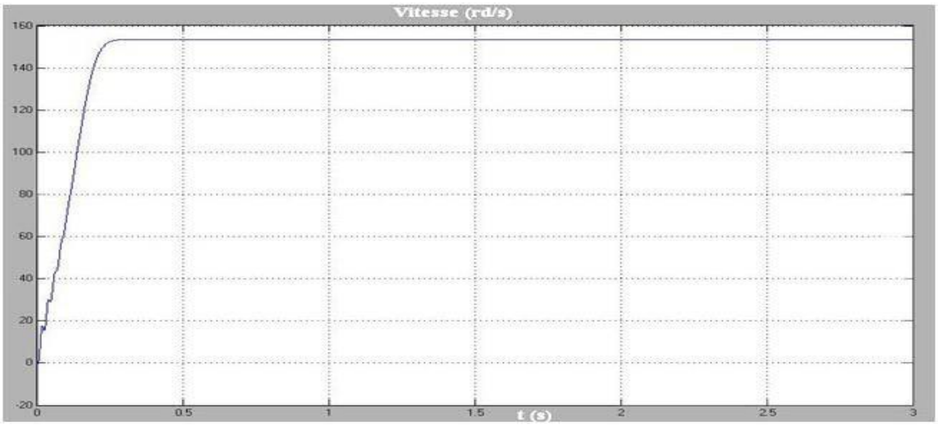


Figure IV.9.a : Vitesse de rotation ω (rad/s).

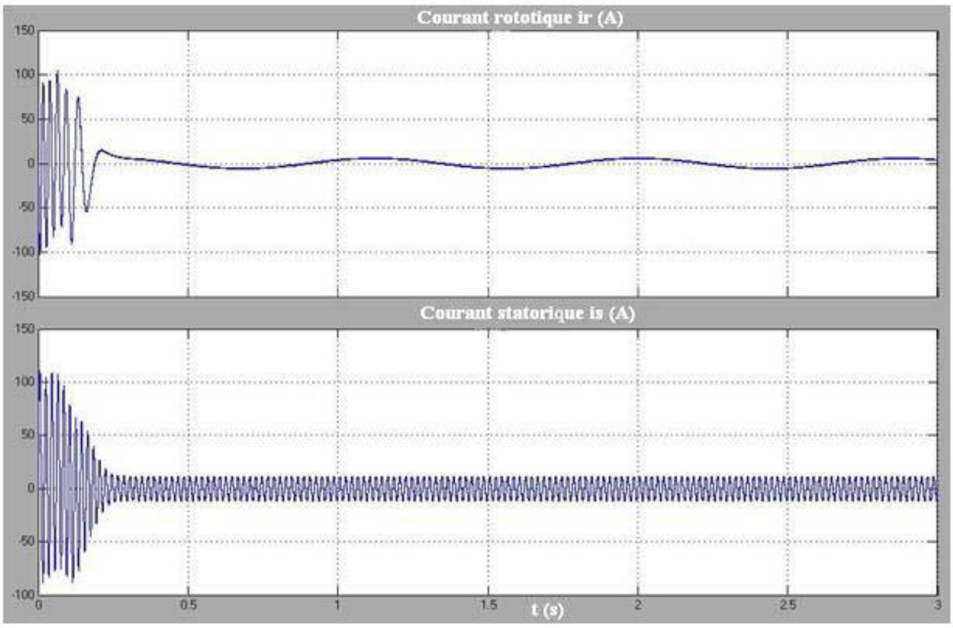


Figure IV.9.b : Courants rototique et statorique « i_s, i_r » (A).

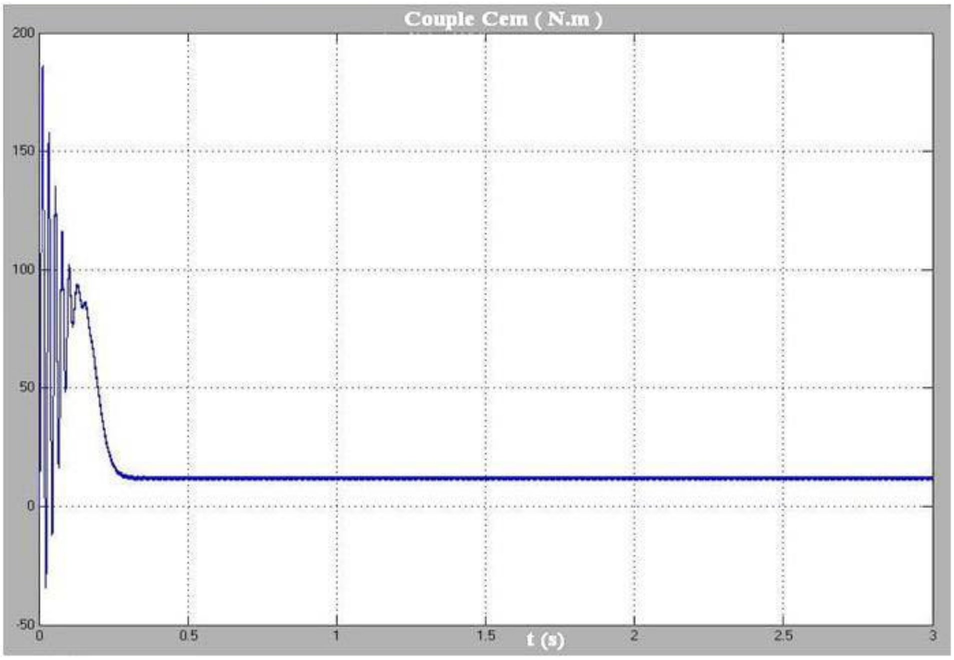


Figure IV.9.c : Le couple électromagnétique Cem (N.m).

Figure IV.9 : Réponses de l'association MAS-onduleur à MLI-Vectorielle

Lors du pilotage par MLI vectorielle, le couple présente moins d'ondulation en MLI vectorielle. Ceci montre que la MLI vectorielle peut apporter une amélioration appréciable dans la tension de sortie.

Elle peut permettre l'alimentation de la machine asynchrone avec une plus grande tension et avec moins de distorsion harmonique.

La commande d'un onduleur par une MLI vectorielle apporte une amélioration perceptible dans la tension de sortie de l'onduleur et une amélioration appréciable dans la performance du moteur qu'elle alimente. Cette partie est nécessaire pour la commande de la machine asynchrone.

IV-7 La commande vectorielle de la MAS

Le principe de la commande vectorielle a été découvert par **Felix Blaschke** en 1972, elle a pour objectif le découplage du flux et du couple dans les machines à courant alternatif. En fait, nous cherchons de nous rapprocher de la commande d'une machine à courant continu, en éliminant tous les problèmes causés par le moteur à courant continu (coût, entretien lourd, puissance massique inférieure...)

De nombreuses variantes de commande vectorielle ont été présentées dans la littérature technique que l'on peut classer de la façon suivante:

- Mode d'alimentation :
  - * Commande en tension.
  - * Commande en courant.
- Détermination de la position du flux :
  - * Directe nécessite mesure du flux ou observation.
  - * Indirecte nécessite le contrôle de la fréquence de glissement.
- Acquisition du flux :
  - * Fondée sur un modèle du rotor.
  - * Fondée sur un modèle du stator.
  - * Observation de flux.
- Orientation du repère d,q sur :
  - * Flux rotorique.
  - * Flux statorique.
  - * Flux d'entrefer. [39]

Le contrôle du flux statorique ou du flux d'entrefer n'assure pas un découplage total entre le couple et celui du flux. Nous nous limitons à étudier le principe de **la commande vectorielle avec orientation du flux rotorique**, car elle présente de meilleures performances par rapport aux autres techniques d'orientation.

IV-7-1 Principes de la commande vectorielle par orientation de flux [40]

Le principe de cette commande est de réduire l'équation de couple électromagnétique de la machine afin d'être comparable à celle d'une machine à courant continu.

Le couple en régime transitoire (quelconque) s'exprime dans le repère *d,q* comme un produit croisé de courants ou de flux:

$$C_e = p\frac{M}{L_r}\left(\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}\right) \qquad \text{(IV.13)}$$

On s'aperçoit que si l'on élimine le deuxième produit (φ_{qr} , i_{ds}), alors le couple ressemblerait fort à celui d'une **MCC**. Il suffit, pour ce faire, d'orienter le repère dq de manière à annuler la composante de flux en quadrature.

C'est-à-dire, de choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d) et donc d'avoir $\varphi_{qr} = 0$. Ainsi $\varphi_r = \varphi_{qr}$ uniquement (**Figure IV.10**).

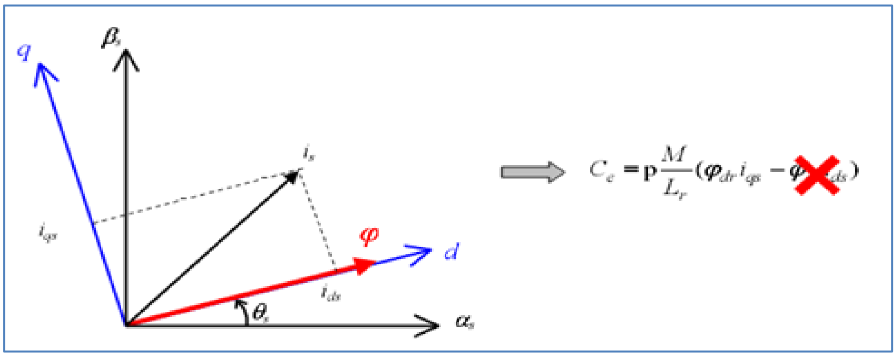


Figure IV.10 : Principe du contrôle vectoriel.

Le couple s'écrit alors : $$C_e = p\frac{M}{L_r}\varphi_r i_{qs} \quad \text{(IV.14)}$$

Il convient de régler le flux en agissant sur la composante i_{ds} du courant statorique et on régule le couple en agissant sur la composante i_{qs}.

On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une **MCC**. Une stratégie consiste à laisser la composante i_{ds} constante. C'est-à-dire de fixer sa référence de manière à imposer un flux nominal dans la machine. Le régulateur du courant i_{ds}^* s'occupe de maintenir le courant i_{ds} constant et égal à la référence i_{ds}^* ($i_{ds}^* = i_{ds}$ Référence).

Le flux étant constant dans la machine on peut imposer des variations de couple en agissant sur le courant i_{qs}.

Si l'on veut accélérer la machine, donc augmenter sa vitesse, on impose une référence courant i_{qs}^* positive. Le régulateur du courant i_{qs} va imposer ce courant de référence à la machine.

D'où un couple positif.

On peut également automatiser le pilotage de cette référence de courant i_{qs}^* en la connectant à la sortie d'un régulateur de vitesse. C'est ce dernier qui pilotera le couple de référence (et donc i_{qs}^{*}) puisqu'il agira au mieux de manière à asservir la vitesse à une vitesse de consigne Ω^*.

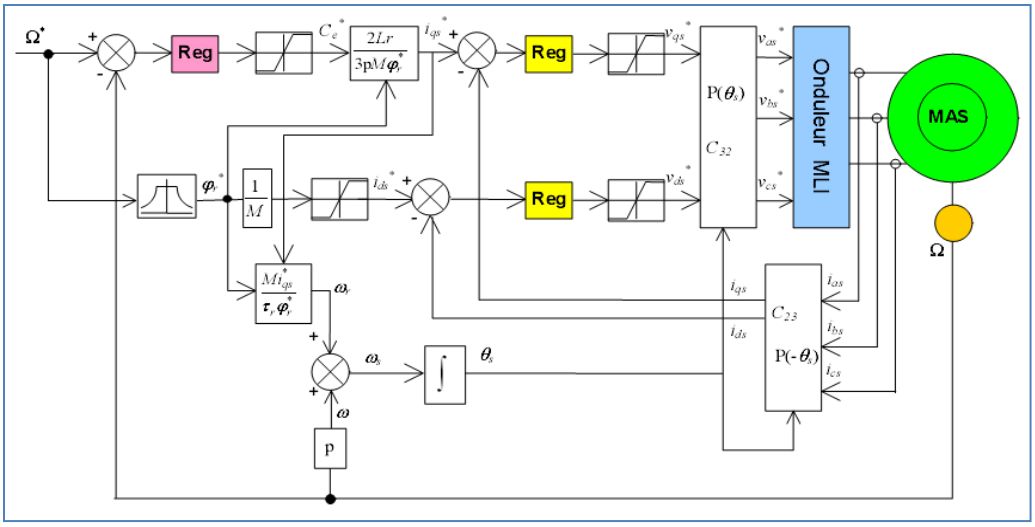


Figure IV.11 : Schéma de régulation de vitesse de MAS en CVFO.

La Figure IV.11 résume cette régulation puisqu'elle représente le schéma de contrôle vectoriel de la machine asynchrone avec une régulation de vitesse et la régulation des deux courants i_{ds} et i_{qs}.

Ces deux courants sont régulés par deux boucles de courants dont les sorties sont les tensions de références $v_{ds}{}^{*}$ et $v_{qs}{}^{*}$ dans le repère dq.

IV-7-2 Calcul des régulateurs [41]

a - Réglage de la boucle de la vitesse

Il prend en entrée la vitesse de référence et la vitesse mesurée. Il agit sur le couple (c'est-à- dire que sa sortie est le couple de référence) pour réguler la vitesse.

Le schéma bloc de la régulation de la vitesse est représenté par la **Figure IV.12** .

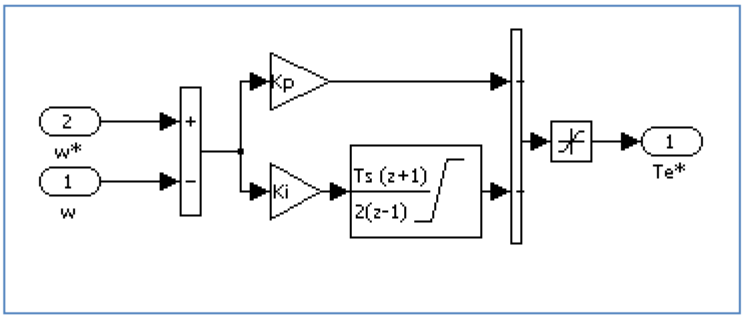


Figure IV.12 : Schéma bloc de régulation de vitesse.

b - Régulateur du flux

Il prend en entrée le flux de référence et le flux estimé. Il convient de régler le flux en agissant sur les constantes Kp et Ki du régulateur PI.

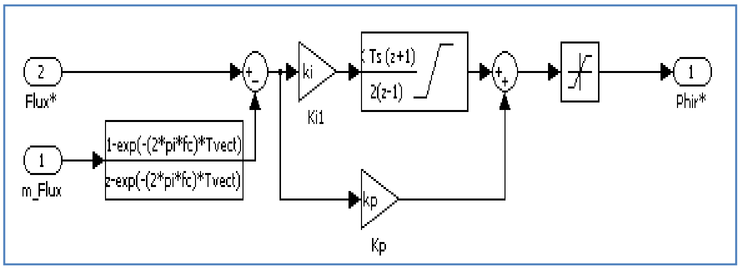


Figure IV.13 : Schéma bloc de régulation du flux.

c - Régulateur du courant

Pour s'assurer que les courants réels suivent les courants de consigne, des régulateurs de courants agissant sur les courants de commande sont indispensables, nous intéressons au dimensionnement des régulateurs présents dans le bloc « Régulateur i » de **la Figure IV.14**. Le régulateur que nous allons utiliser est du type proportionnel-intégral (**PI**).

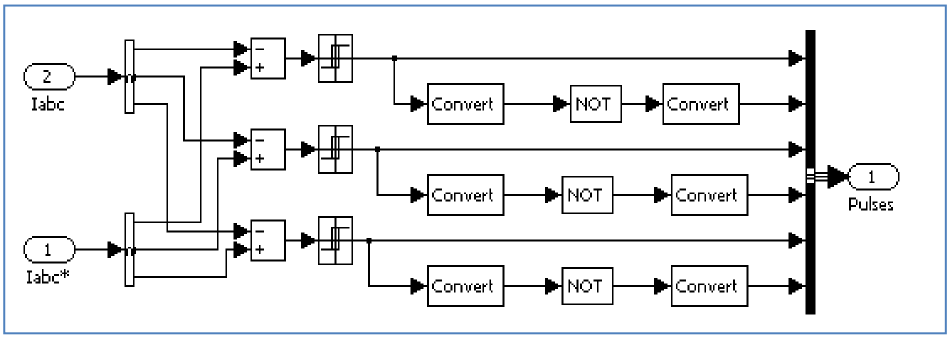


Figure IV.14 : Schéma bloc de régulation du courant.

IV-8 Simulation de la commande vectorielle par orientation de flux

IV-8-1 Modèle de la CVFO en SIMULINK

La **Figure IV.15** montre le schéma de la commande CVFO dans l'environnement SIMULINK effectuée à l'aide des modèles détaillés dans **les Figures IV.11, 12, 13, 14.**

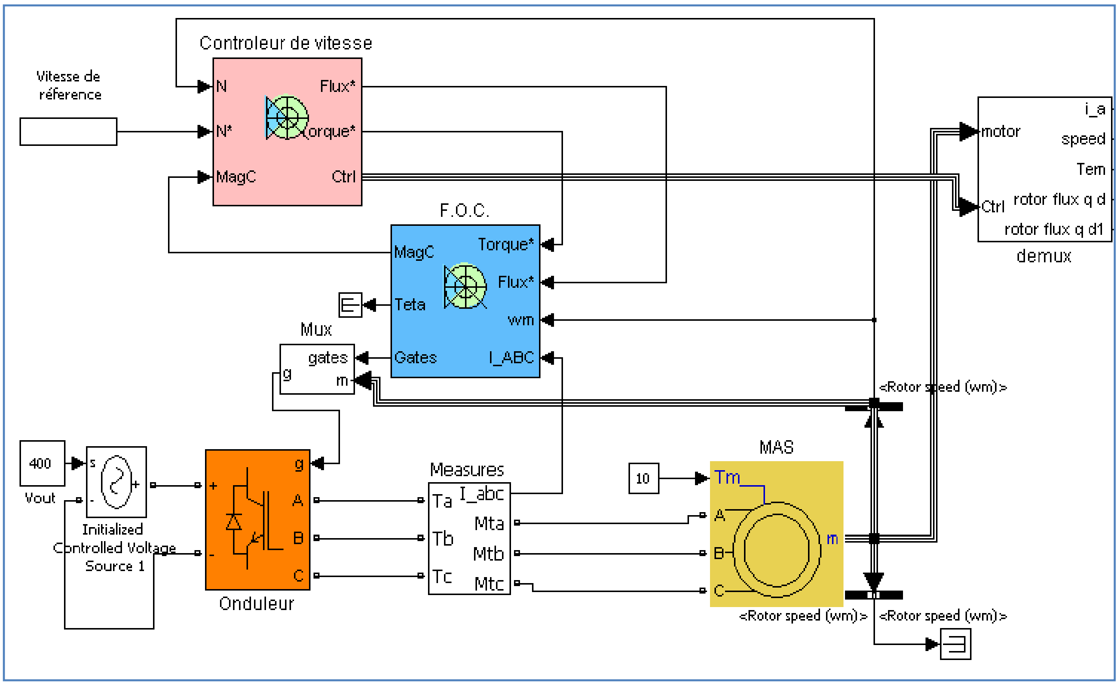


Figure IV.15 : Bloc de la commande vectorielle de MAS par flux orienté(CVFO) Alimenté par un onduleur MLI avec un contrôleur de vitesse.

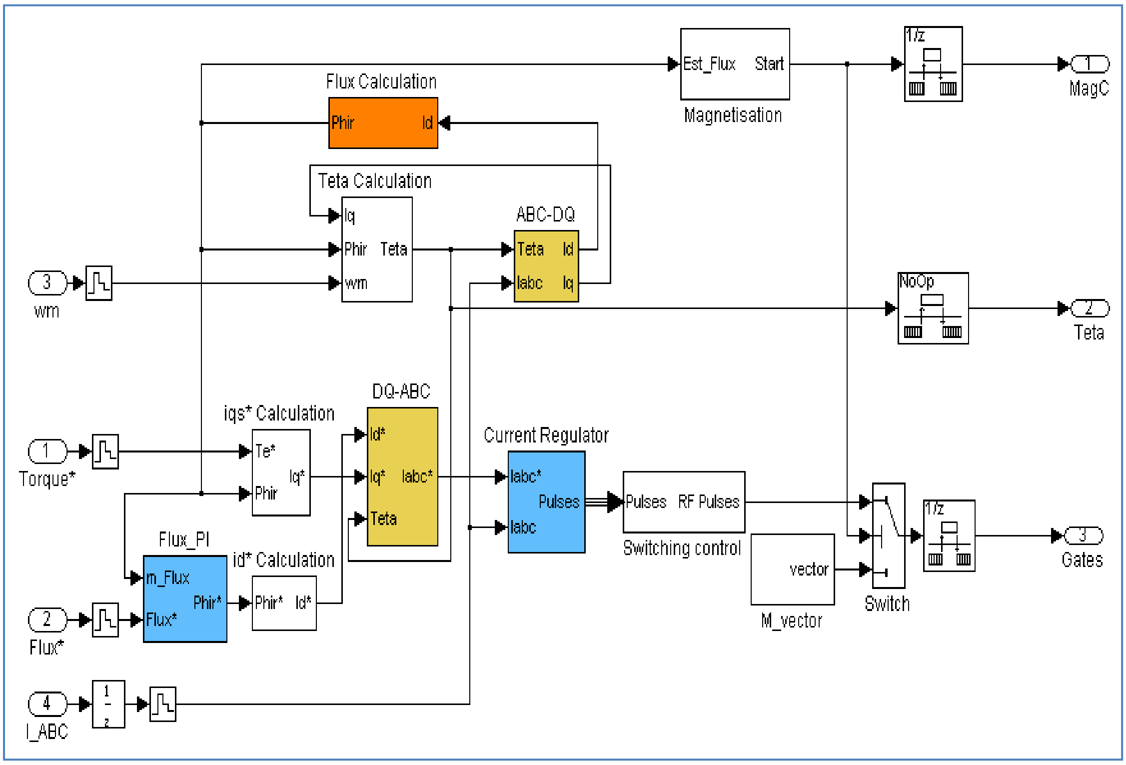


Figure IV.16 : Subsystem de la commande CVFO.

IV-8-2 Résultats de simulation

Les paramètres utilisés sont ceux de la machine asynchrone (**Annexe 4**), sans prise en compte de la saturation magnétique et avec une vitesse de référence : $\omega^*_{réf} = 150$ rad/s.

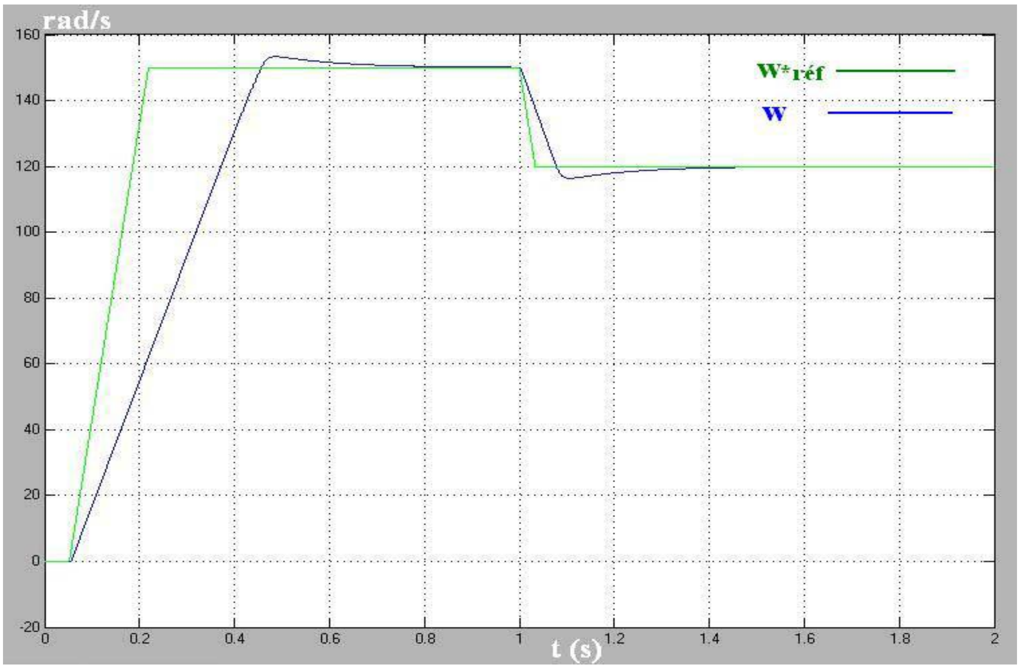


Figure IV.17.a : La vitesse du rotor « ω » et sa référence.

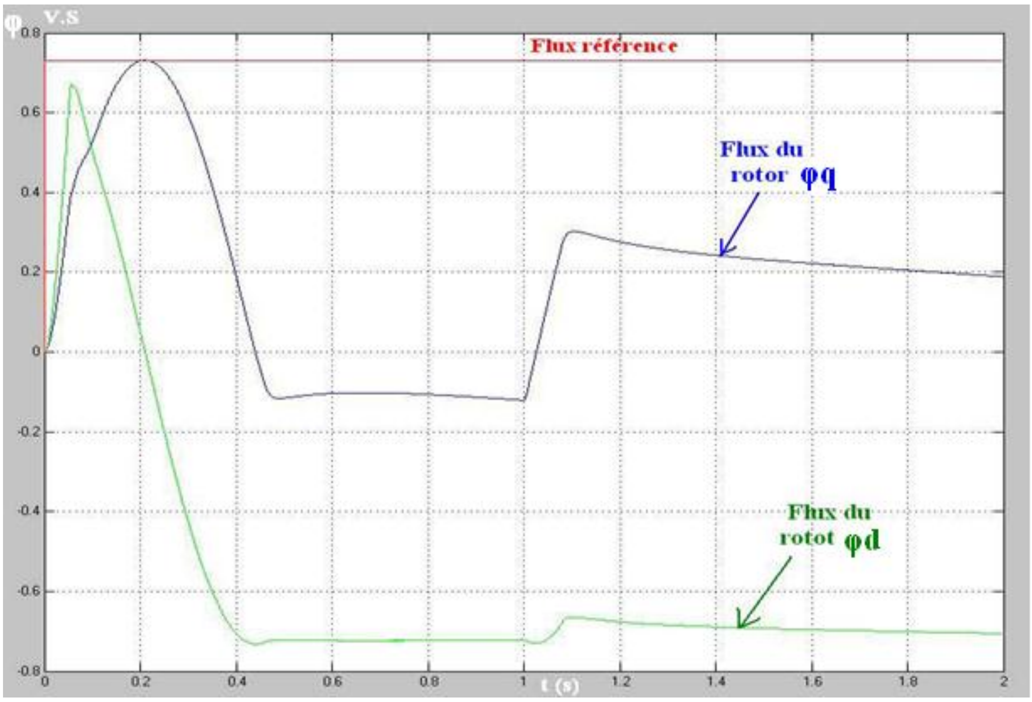


Figure IV.17.b : Le flux du rotor « φq » et « φd » et son référence.

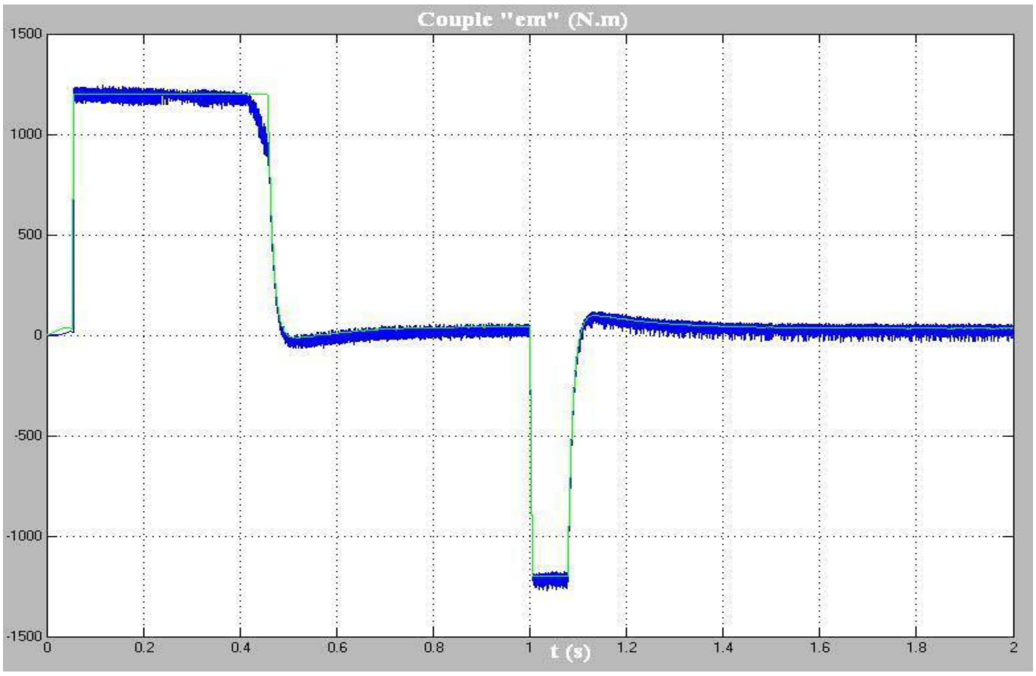


Figure IV.17.c : Le couple électromagnétique « Ce » et son référence.

IV-8-3 Interprétation des Résultats

Figure IV.17.c montre l'allure du couple de consigne superposé au couple simulé par le modèle de la machine, ainsi que la vitesse mécanique. Ce résultat permet de constater l'efficacité de la commande vectorielle dans les changements brusques de couple électromagnétique, synonyme de grandes capacités dynamiques.

De plus l'allure de la vitesse nous montre le comportement purement intégral **Figure IV.17.a,** posons une vitesse de référence égale à 120 rad/s à l'instant « 1s », on remarque que la vitesse du rotor suit parfaitement sa référence.

Figure IV.17.b montre les flux rotoriques des axes **d** et **q** tout au long du même essai, nous voyons que le flux d'axe **q** est très petit comme souhaité et le flux d'axe **d** correspond à la consigne, ceci est la preuve du découplage des axes de la commande vectorielle à flux rotorique orienté.

La vitesse de la machine suit sa consigne sans dépassement montrant l'efficacité de la boucle de régulation de vitesse. Ce qui permet par la suite d'atteindre le débit et la hauteur manométrique totale désirés.

Le flux rotorique est maintenu constant au voisinage de sa valeur de consigne montrant l'efficacité de la boucle de régulation de flux.

IV-9 Modèle de la pompe centrifuge [42]

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur.

$$C_r = K_{ch} \times \omega^2 \qquad \text{(IV.15)}$$

Avec K_{ch} : désigne la constante de proportionnalité et ω : la vitesse de rotation du moteur.

Connaissant les performances d'une pompe centrifuge (Q, H et P) pour la vitesse **N**, les lois de similitude permettent de déterminer les performances (Q', H' et P') pour une vitesse **N'**en utilisant les relations suivantes:

$$Q' = Q\frac{N'}{N} \quad , \quad H' = H\left(\frac{N'}{N}\right)^2 \quad , \quad P' = P\left(\frac{N'}{N}\right)^3 \qquad \text{(IV.16)}$$

Avec Q et Q', les débits correspondants respectivement à la vitesse N et N; ' H et H' les hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement à la vitesse N et N; et ' P et P' sont les puissances du moteur correspondant respectivement à la vitesse N et N '.

Figure IV.18 présente le modèle de la pompe centrifuge basé sur les équations mathématiques précédentes.

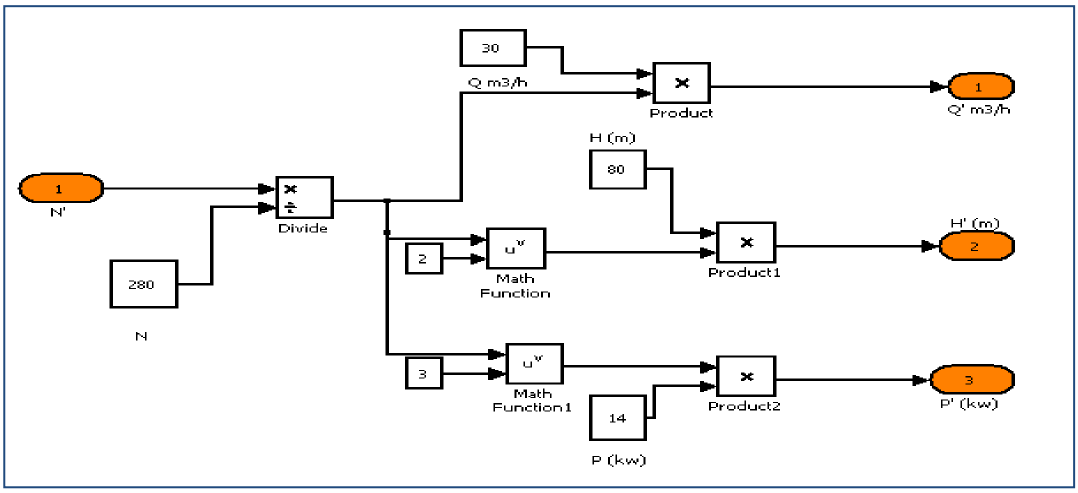


Figure IV.18 : Bloc SIMULINK de la pompe centrifuge.

IV-10 Optimisation du système de pompage PV global

IV-10-1 Modèle global du système

La **Figure IV.19** représente le schéma synoptique du système de pompage photovoltaïque global avec les différentes commandes utilisées.

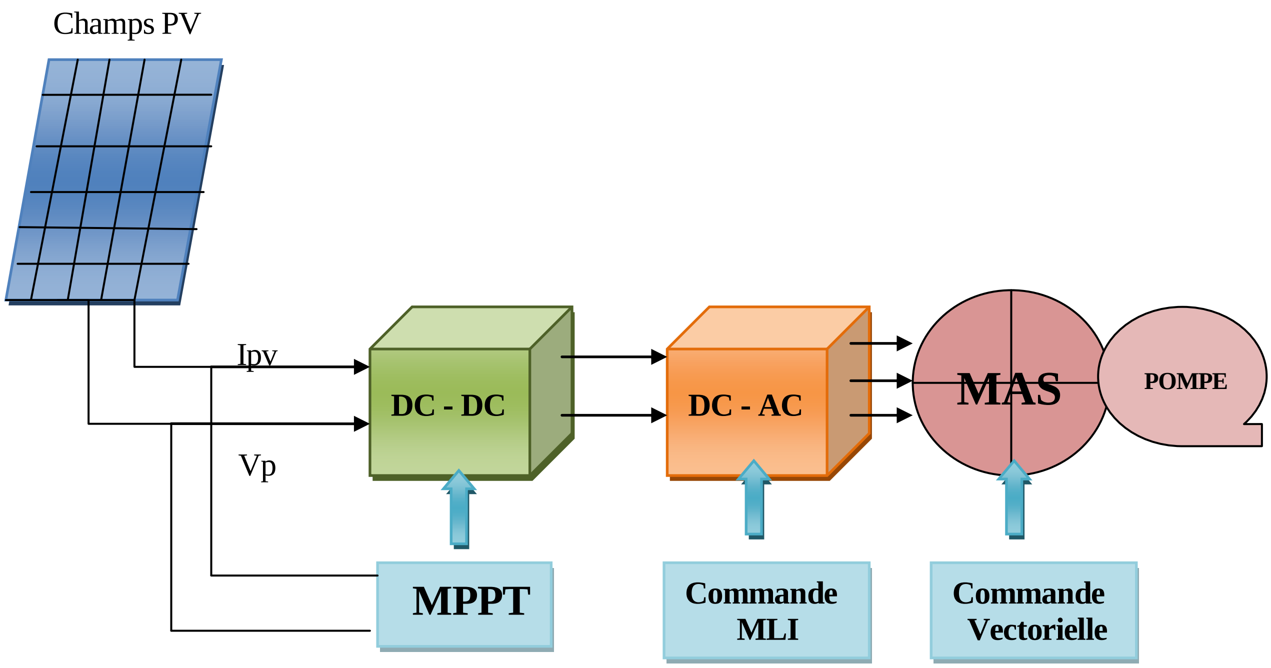


Figure IV.19 : Synoptique du système de pompage global.

Le modèle SIMULINK présenté dans la **Figure IV.20** représente le groupement du modèle SIMULINK du générateur photovoltaïque, la commande MPPT, le hacheur survolteur, l'onduleur MLI, le moteur à induction avec sa commande vectorielle par flux orienté et la pompe centrifuge.

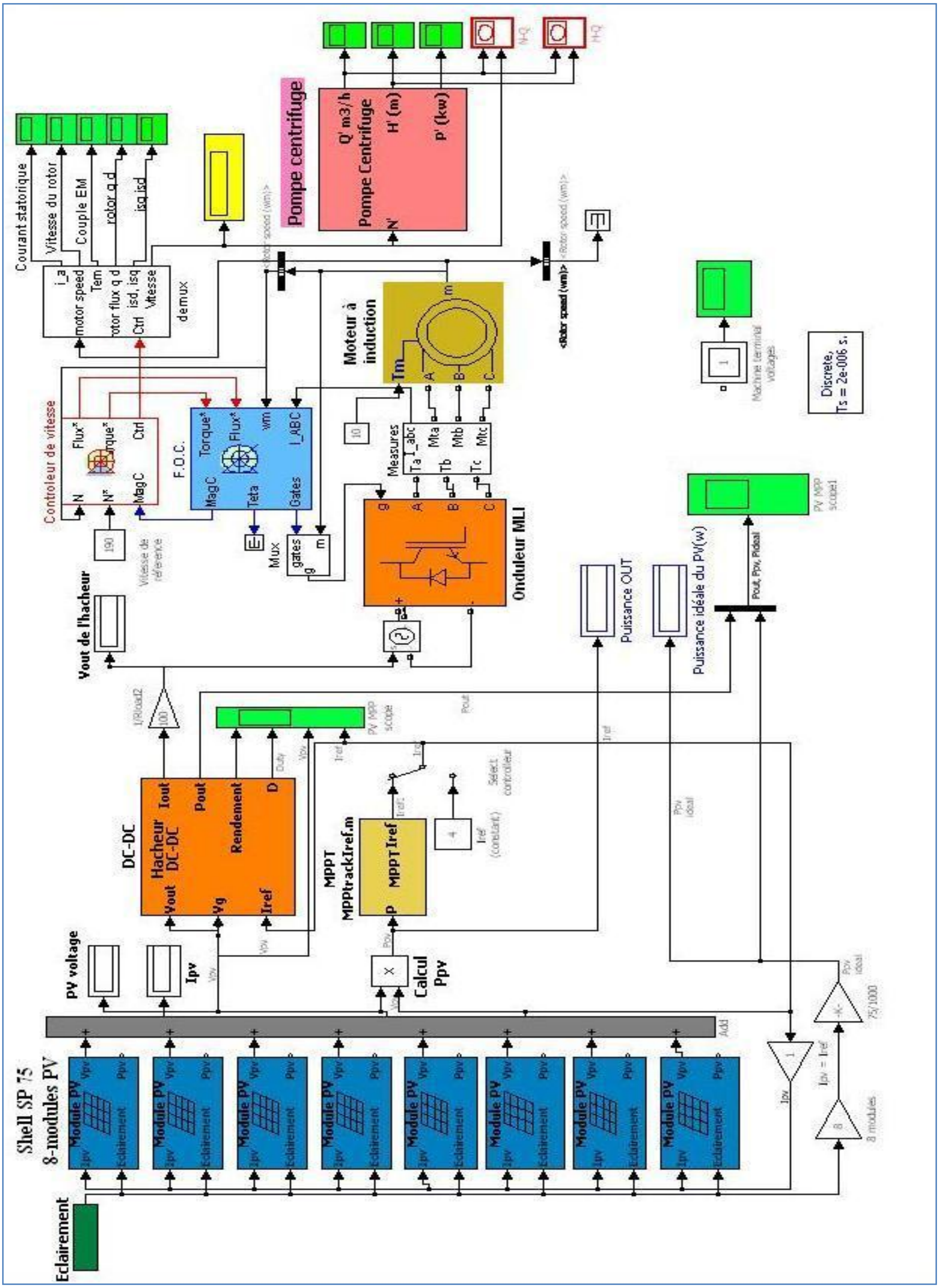


Figure IV.20 : Modèle SIMULINK du système de pompage global.

IV-10-2 Résultats de simulation en régime dynamique

Les résultats de simulation illustrés par la **Figure IV.21** concernent le groupe motopompe (MAS + pompe) alimenté par un GPV fonctionnant en régime **dynamique**, c.à.d. lorsqu'il y a une variation brusque de l'éclairement.

A partir les caractéristiques ci-dessous en vérifiant le principe de la commande à flux rotorique orienté de la machine asynchrone, y compris l'estimation du flux de rotor et le traqueur de point maximum de puissance, des simulations numériques ont été présentées.

Toutes les grandeurs (vitesse, tension, débit et courant du GPV) se stabilisent après un temps de réponse t = 0, 2 s, après chaque niveau d'éclairement appliqué. On constate aussi qu'il y a une oscillation pour les différentes grandeurs à cause de la technique de MPPT qui oscille autour de point de puissance maximale surtout pour les faibles éclairements.

Nous appliquons cinq niveaux d'éclairement (E = 400W/m², E = 600 W/m², E = 800 W/m², E = 1000 W/m² et E =600W/m² successivement) chaque 0.3 s, tout en gardant une température constante égale à 25°C, les résultats de simulation obtenus sont présentés par les **Figures IV.21**

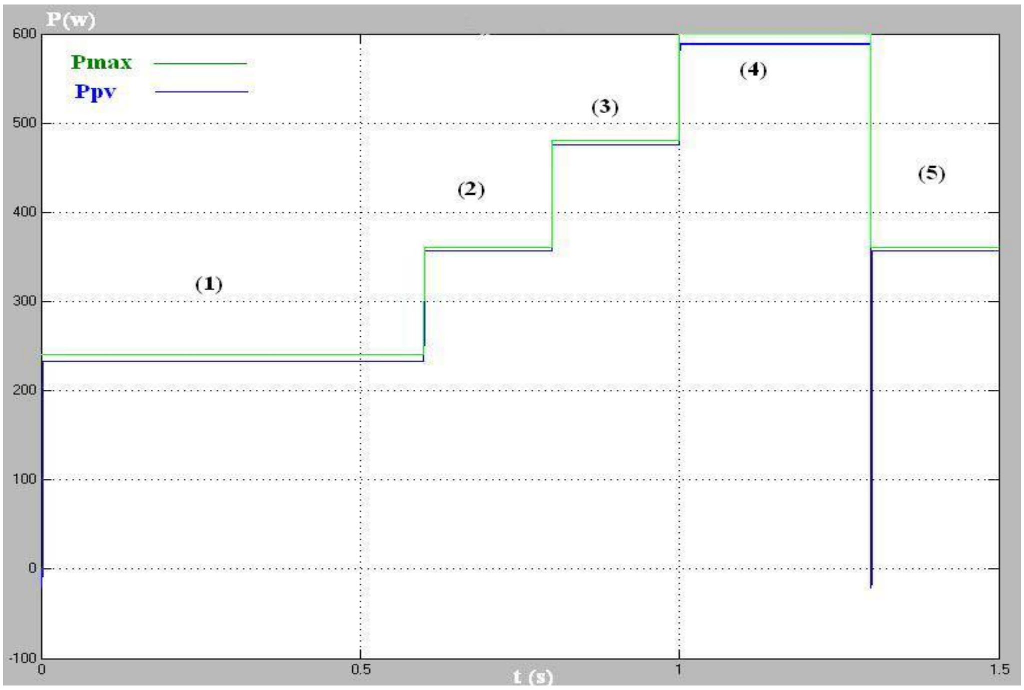


Figure IV.21 a : Puissance du GPV P(t).

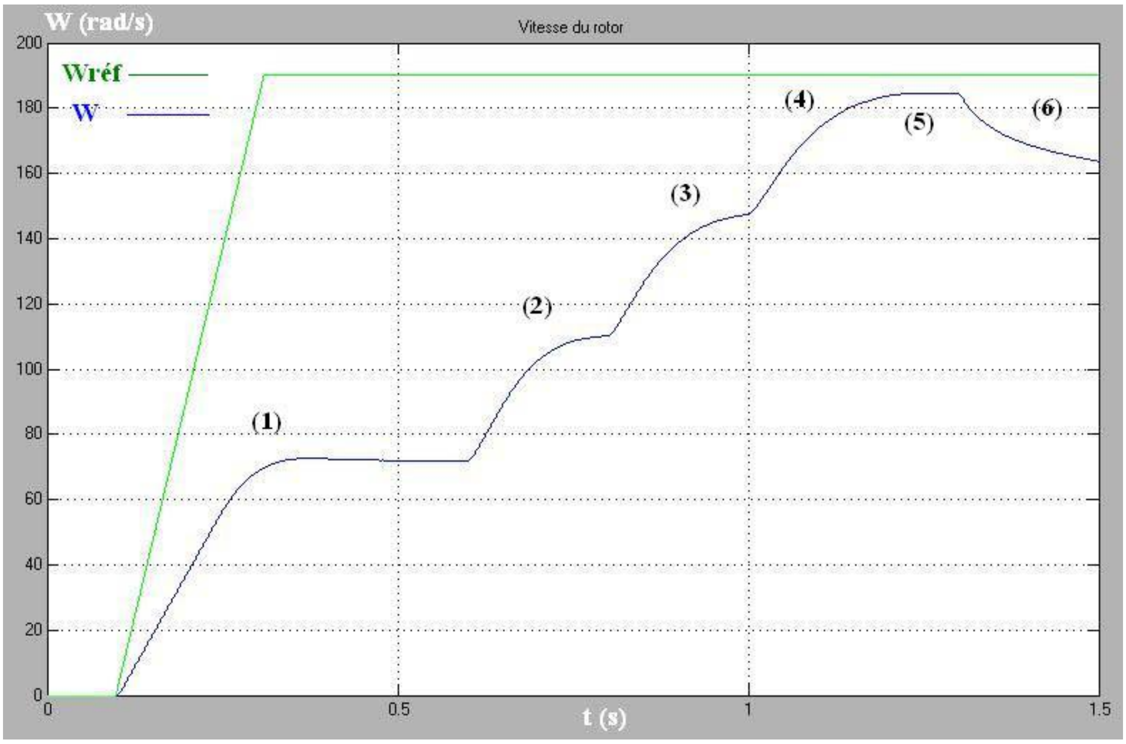


Figure IV.21 b : Vitesse du rotor ω(t).

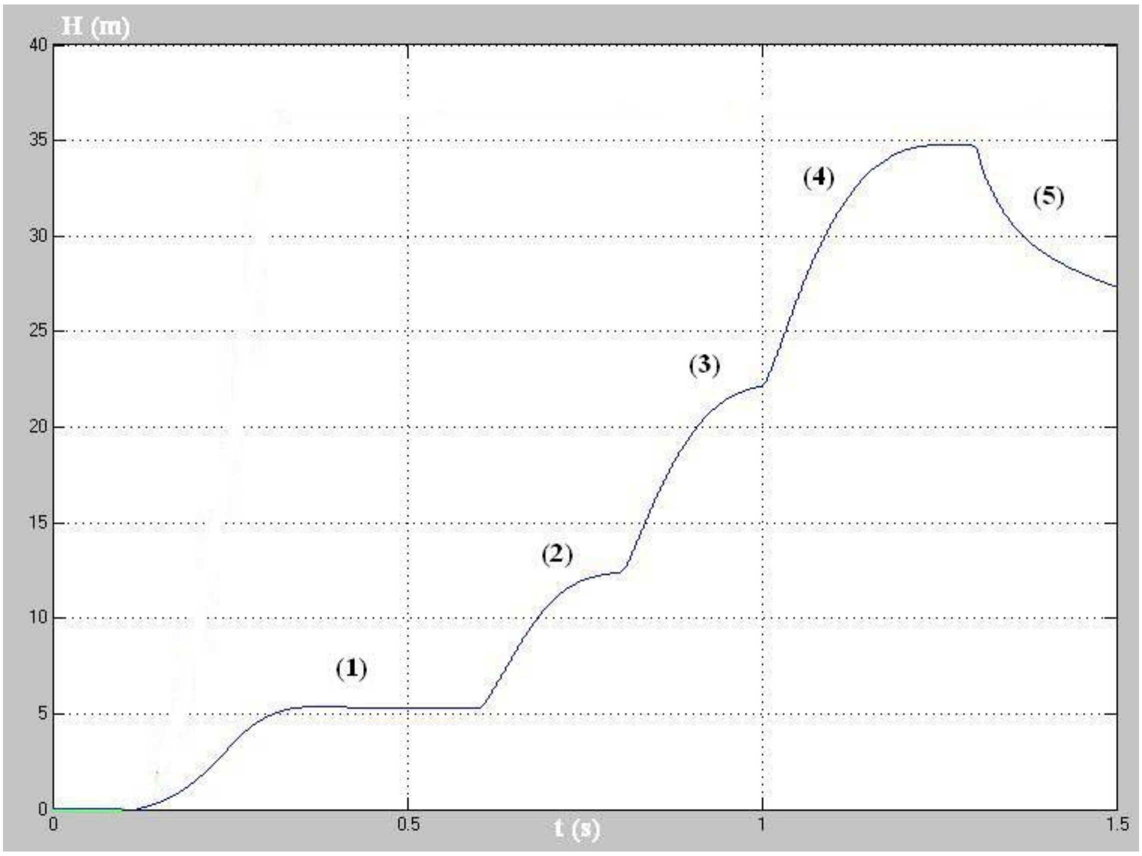


Figure IV.21 c : Hauteur manométrique de la pompe H(t).

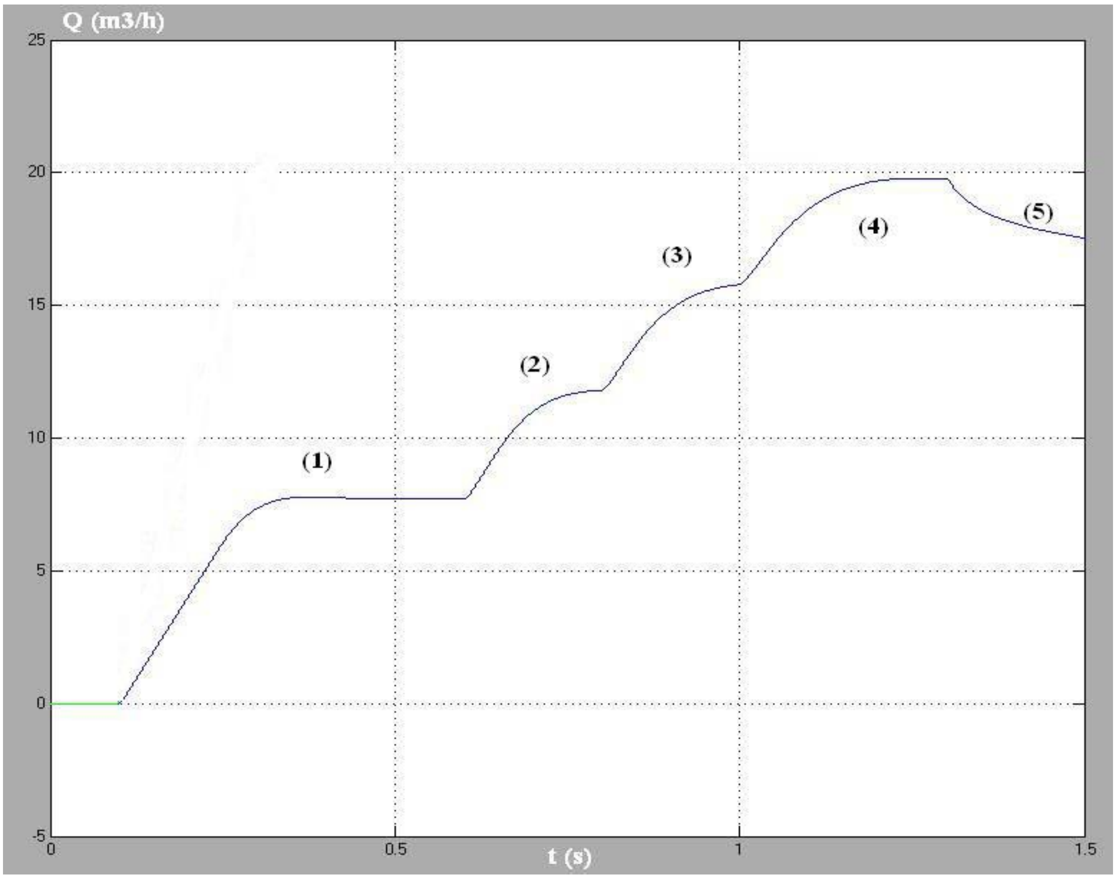


Figure IV.21 d : Débit de la pompe Q(t).

Figure IV.21.Résultats de simulation des différentes grandeurs du système de pompage Photovoltaïque (T=25°C).

(1) E = 400 W/m² , (2) E = 600 W/m² , (3) E = 800 W/m²

(4) E = 1000 W/m² , (5) E = 600 W/m²

Aux premiers paliers d'éclairements E =400W/m, E =600W/m et E =800W/m, les valeurs de la puissance maximale du GPV sont : 230 W, 355 W et 460 W (**Figure IV.21 a)**, ainsi que les vitesses du rotor correspondantes sont : 65 rad/s, 125 rad/s et 149 rad/s, (**Figure IV.21 b**). Ensuite les valeurs des débits de la pompe sont : 8 m^3/h, 12 m^3/h et 16 m^3/h.

Pour l'éclairement E =1000W/m, la valeur de la puissance du GPV est 588 W proche de sa puissance maximale 600 W, (**Figure IV.21 a)**, la vitesse du rotor est environs 183 rad/s (**Figure IV.21 b**). Le débit de la pompe est : 19 m^3/h.

Pour une diminution d'éclairement de 600 W/m², il y a une diminution de puissance électrique maximale jusqu'à 350 W. De même la vitesse du rotor et le débit de la pompe ont diminué.

IV-10-3 Résultats de simulation en régime permanant

Les **Figure IV.22** représentent les différentes grandeurs du système de pompage photovoltaïque pour une plage de l'éclairement entre 500 W/m² et 1000 W/m² avec une température constante T=25°C en régime permanent.

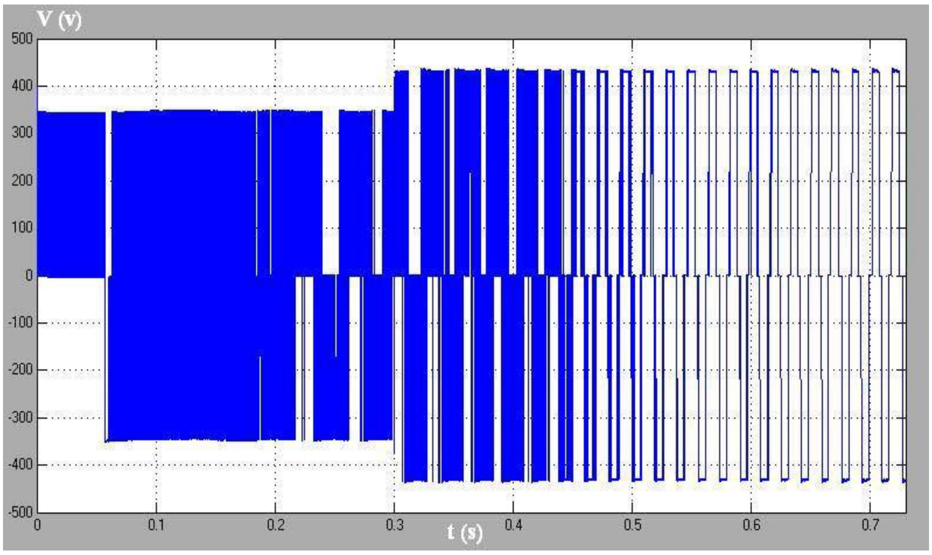


Figure IV.22 a : Tension sortie de l'onduleur.

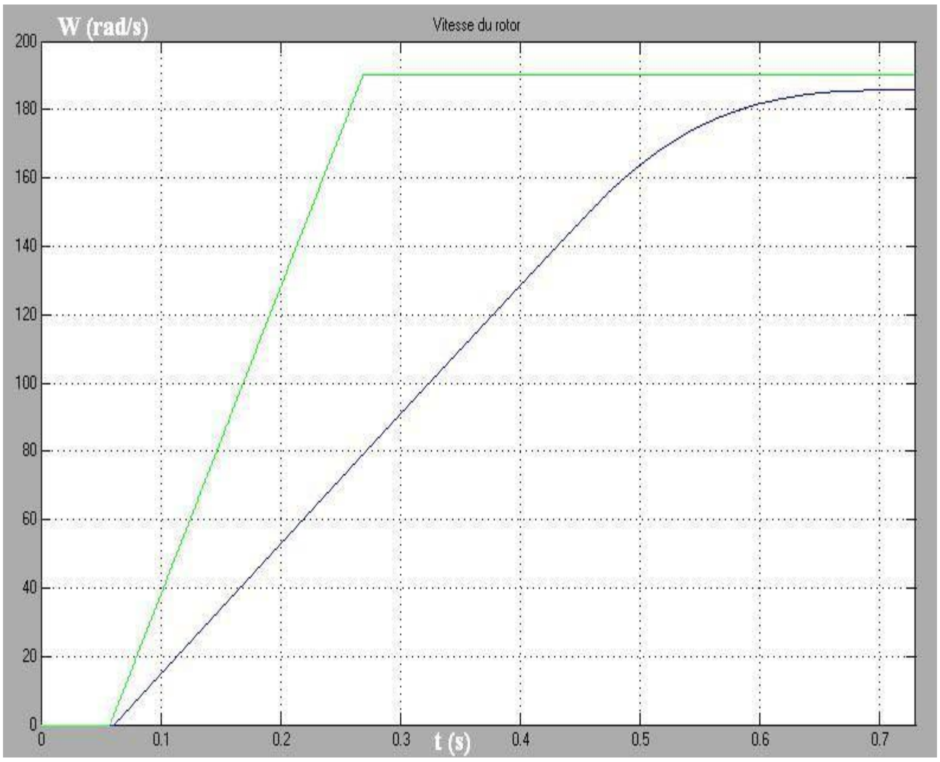


Figure IV.22 b : Vitesse du rotor ω(t).

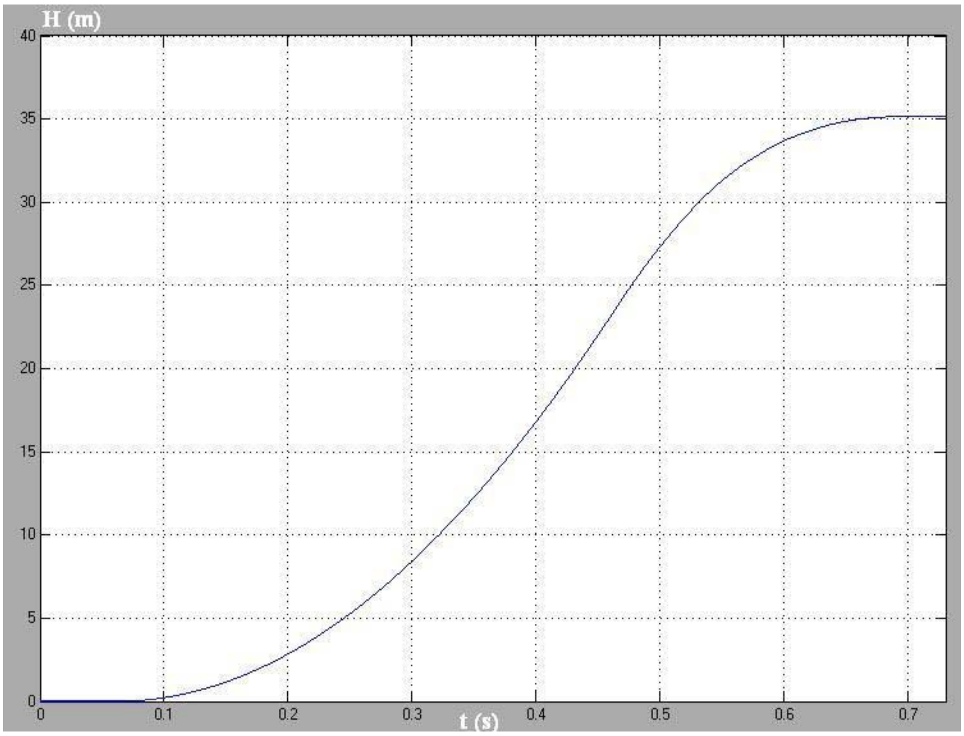


Figure IV.22 c : Hauteur manométrique de la pompe H(t).

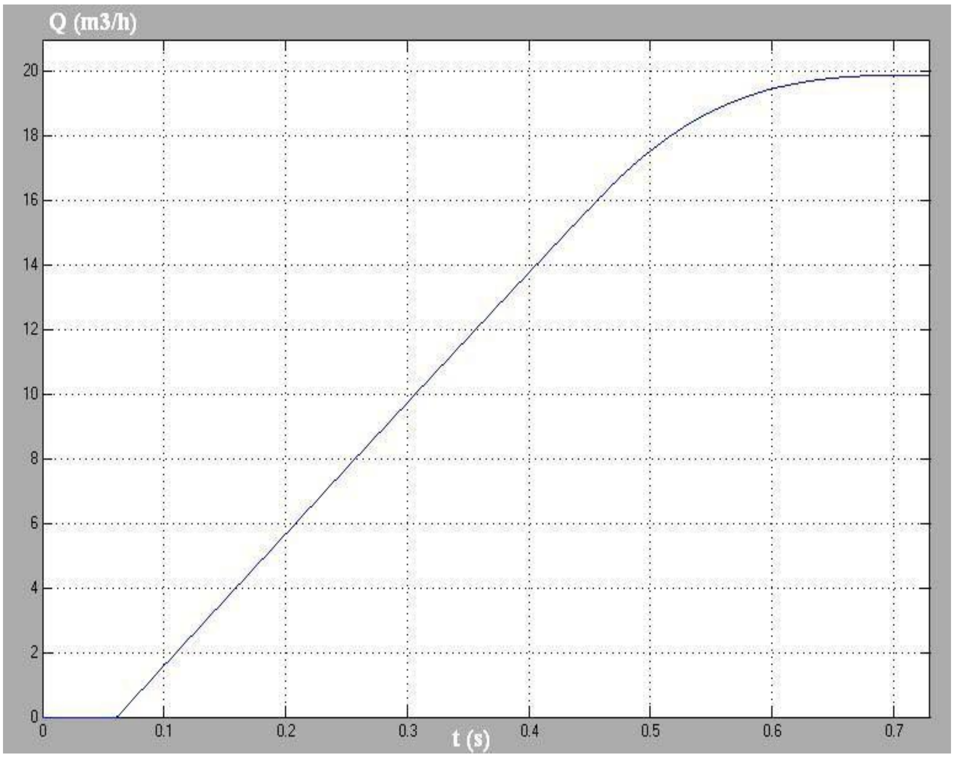


Figure IV.22 d : Débit de la pompe Q(t).

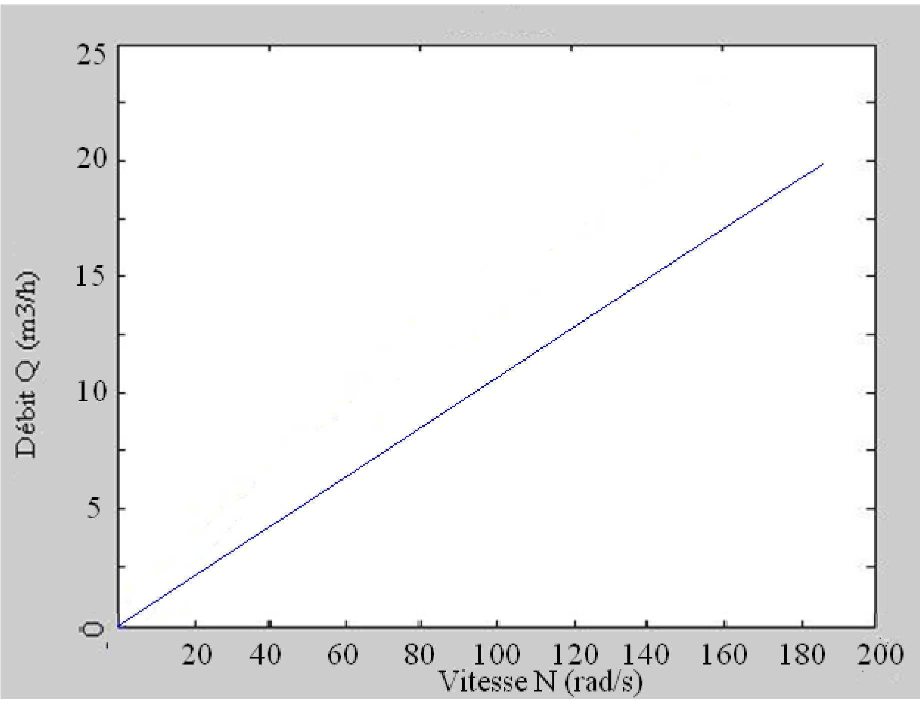


Figure IV.22 d : Caractéristique Q=f (N) de la pompe.

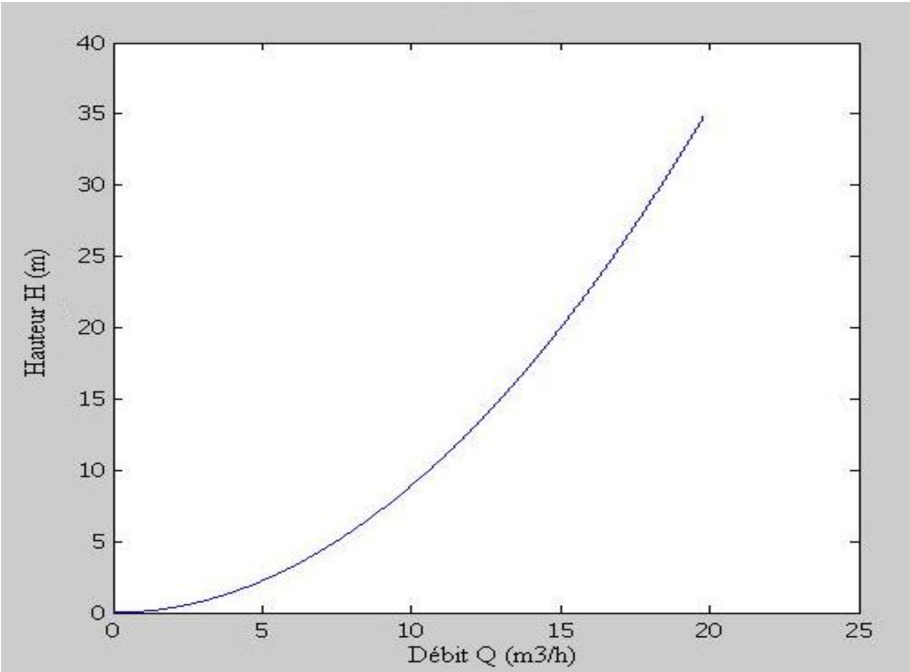


Figure IV.22 e : Caractéristique H=f (Q) de la pompe.

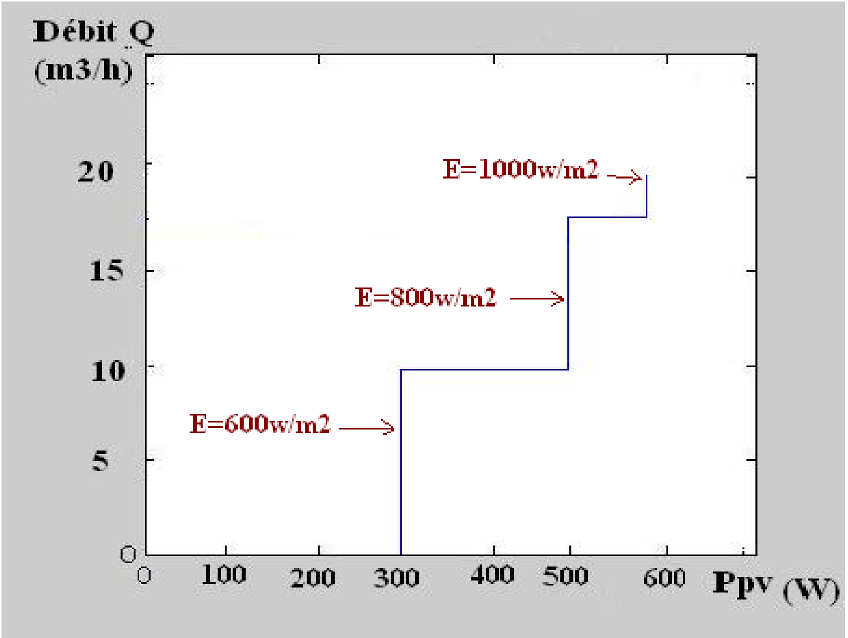


Figure IV.22 f : Caractéristique Q=f (Ppv) .

Figure IV.22.Résultats de simulation des différentes grandeurs du système de pompage Photovoltaïque (T=25°C). E : de 500 W/m² à 1000 W/m².

Figure IV.22 présente le scénario de l'ensoleillement appliqué sur le GPV. Le changement de l'éclairement influe sur les caractéristiques de la machine asynchrone et par la suite sur les performances de la pompe.

Résultats numériques

Pour un éclairement : **E= 1000 w/m²** et pour une vitesse de référence : **$\omega_{réf}$ = 190 rad/s**.

- La puissance de sortie du générateur PV : **P = 598.4 w.**
- La vitesse du rotor maximale: **ω = 185.7 rad/s**.
- Le débit maximal de la pompe : **Q = 19.9 m³/h.**
- La hauteur maximale de la pompe : **H = 35.19 m.**

Les résultats de simulation montrent ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT dans l'extraction de la puissance maximale, afin d'exploiter la vitesse optimale en vue d'obtenir le débit maximal disponible.

IV-11 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons étudié une structure de commande utilisant à la fois le concept de la méthode du flux orienté pour la machine asynchrone et le fonctionnement en MPPT pour l'adaptateur de puissance. La stratégie de commande vectorielle par orientation du flux rotorique a servi ici comme une solution pour contrôler le débit et la hauteur manométrique totale de la station de pompage.

La commande avec l'adaptateur MPPT permet d'optimiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement. Ce qui a permis de faire fonctionner la station au point de fonctionnement optimal.

L'optimisation du système proposé utilise la méthode MPPT « Perturbations et Observation ».
Cet algorithme ne tient pas compte de la variation des paramètres influençant le modèle du système de pompage, tels que la température et les paramètres du moteur. Ce qui limite sa robustesse.

Il existe d'autres techniques modernes, insensibles et robustes, basées sur l'intelligence artificielle qui permettent une optimisation en temps réel du système de pompage.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduits à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande du monde jusqu'à maintenant, est l’énergie solaire, qui est libre et abondante dans la plupart des régions du monde, et est avéré une source économique.

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittent selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients. Ce mémoire s’agit d’une contribution à l'optimisation de l'ensemble composé de: l'onduleur, le hacheur, le moteur et la pompe qui sont reliés à un générateur solaire.

Cette étude couvre, en détail, les caractéristiques du générateur photovoltaïque et de ses applications dans un secteur rural tel que les systèmes autonomes ou dans la ville comme dans le cas des systèmes connectés au réseau. La technique d'algorithme d'optimisation du générateur solaire, qui a été étudiée est la perturbation et l'observation (P&o), elle est généralement utilisée par les concepteurs de suiveur de point de puissance maximum (MPPT), mais elle souffre de quelques inconvénients, du point de vue de l'exécution ou dans le processus de poursuite.

En outre, la modélisation et la simulation de différents sous-ensembles de l'ensemble composé de: l'onduleur, le hacheur, le moteur asynchrone et la pompe branchés sur un générateur photovoltaïque, dans l'environnement de programmation de MATLAB /SIMULINK ont été développées. Les résultats de simulation ont montré l'évolution de tous les paramètres de chaque sous-ensemble aussi bien que le système entier.

L’onduleur triphasé représente un sous-ensemble important pour entrainer le moteur asynchrone alimenté par un générateur photovoltaïque. Plusieurs techniques des commandes de l'onduleur existent dans la littérature pour la commande d'onduleur. Pour l'optimisation de l'onduleur conçu et réalisé, une technique MLI vectorielle est adoptée puisqu'elle n'est pas difficile à mettre en application.

L'optimisation du moteur à induction est basée sur la technique de conduite utilisée. Différents auteurs dans la littérature du moteur à induction ont proposé plusieurs techniques conduisant, chaque méthode est utile pour une application spécifique. Dans l'armature de ce travail, nous avons montré que le contrôle vectoriel est introduit afin de pouvoir commander la machine asynchrone avec le maximum de dynamique.

L’objectif du contrôle par orientation du flux est le découplage des grandeurs responsables de la magnétisation de la machine et de la production du couple.

Mathématiquement, la loi de commande consiste à établir l’ensemble des transformations pour passer d’un système possédant une double non linéarité structurelle à un système linéaire qui assure l’indépendance entre la création du flux et la production du couple comme dans une machine à courant continu à excitation séparée.

Les résultats obtenus par simulation montrent qu’il est possible de régler convenablement l’adaptation MPPT, les courants statoriques et la vitesse. Quel que soit le type de découplage proposé, un risque d'instabilité existe si les paramètres du modèle évoluent et pose donc un problème de robustesse de la commande.

Pour poursuivre ce modeste travail nous proposons les perspectives suivantes :

- L’optimisation de système de pompage photovoltaïque par des autres techniques d’intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous.
- Développer des lois de commande à base des techniques intelligentes et ceux-ci en vue de surmonter les problèmes de non linéarité du modèle imposé par la source PV et la charge. Par ailleurs, l’amélioration du bilan énergétique pourrait être examinée en considérant le niveau du flux rotorique comme un degré supplémentaire dans la procédure d’optimisation.
- Investiguer au niveau de l’implantation des lois de commande envisagées, par l’utilisation de la carte DSP MCK 240 ou la carte Dspace 1104.

Bibliographie

Références Bibliographies

[1] : A.Hamidat, « *Simulation des systèmes de pompage photovoltaïques destines pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation* », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen 2004.

[2] : S.Aminata, «*Simulation du système hybrides Photovoltaïque* » Thèse de Doctorat, canada, 1998.

[3] : B.Mohammed, «*Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome*», Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2007.

[4] : R.P.Mukund, «*Wind and solar Power Systems* », Ph.D,P.e Université merchant Marine, 1999.

[5] : M.Dahbi « *Etude et optimisation d'une installation Hibride PV-Eolienne*», Thèse de Doctorat, Université de Bechar, 2007.

[6] : « *Les piles solaires, le composant et ces applications* » Edition.Masson (1985).

[7] : A. buyers « *Les systèmes photovoltaïques* » guide,.Article, Canada, 2002.

[8] : F.Benyarou et B.Benyousef, « *Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin*», Revue des Energies Renouvelables, (1998pp.95-100).

[9] : T.Fogelman, « *Système photovoltaïque pour les pays en déventement* », manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME), 1982.

[10] : C.Bernard, J.Chauvin, D.Lebrun, J.F.Muraz, P. Stassi, « *Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger* » 2006.

[11] : A.Guen, « *Contribution à l'étude des systèmes de télécommunications mobiles* » Thèse de Magister, Université de Tlemcen, Février 1992.

[12] : www.solarelectricpower.org

[13] : D.Thévenard, and M.Ross « *Validation and Verification of Component Models and System Models for the PV* », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.

[14] : D.Turcotte,M.Ross and F.Sheriff. « *Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools* » PV Horizon,.ARTICLE PDF, Canada, 2001.

[15] : J.LABBÉ « *L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isoles* », thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 21 Décembre 2006.

[16] : Dirk. Sauer, « *Electrochemical Storage for Photovoltaics* », Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004.

[17] : M.Rachid, « *Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et Bouzareah* », Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2005.

[18] : S.Bouazza, H.Bouchnafa, « *Estimation des énergies incidentes et fournies par module photovoltaïque* », Mémoire de DES, Université de Tlemcen, Juin 2001.

[19] :A. Hamidat, « *Etude et simulation des performances réelles sur une longue période des systèmes de pompage photovoltaïque au fil du soleil* », Thèse de magistère, CDER, 1989.

[20] **:** T. Fogelman, « *Système photovoltaïque pour les pays en développement* », Manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, (AFME), 1982.

[21] : B.Azoui, « *Modelisation and experimentation of low power system aimed to electrification of mountainous and isolation region* », Thèse de Magister, Université de Batna, 1990.

[22] : A.Betka, « *Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil* », Thèse de Magister, Centre universitaire Biskra, 1997.

[23] : A.Benatiallah, « *Etude expérimentale et simulation des performances d'une installation photovoltaïque de faible puissance* », Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 1998.

[24] : F.Benyarou « *Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation* », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen, Juillet 2004.

[25] : N.Ourabia, « *Développement d'un convertisseur triphasé* », Rapport Interne Labo. PV. CDER.

[26] : M. T. Boukadoum « *Contribution à l'étude et à la conception d'un convertisseur statique DC/AC triphasé destiné à un système de pompage photovoltaïque* », Thèse de Magister au CDER, 1990.

[27] : S.Diaf, « *Expérimentation d'un système de pompage photovoltaïque sur site saharien* », Thèse d'ingénier d'état, CDER, 1992.

[28] : S.Diaf « *Etude et optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque* », Thèse de Magister, Université de Boumerdès, 2002.

[29] : Techniques de l'ingénieur, « *Mécanique et chaleur, pompes, vide, air comprimé* », NB4, Paris, 1988.

[30] : S.Belakhal « *Conception et commande des machines à aliments permanents dédiées aux énergies renouvelables* » Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.

[31] : B.Chikh-Bled et O. Sebbane, « *Mise au point d'un banc d'essais : installation de pompage d'eau* », Mémoire d'ingénieur d'état, Institut de Génie Mécanique, 1996.

[32] : N.Nooma, SONG.Taaba « *Groupe motopompe* » mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, 2004.

[33] : J.Royer T.Djiako, E.Schiller, B.Sada Sy « *Le Pompage Photovoltaïque* » Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.

[34] : A.Saadi « *Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque* », Mémoire de Magister en électronique, Université Mohammed Khider, Biskra, 2001.

[35] : A.MOUSSI, A.SAADI « *Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque* » LARHYSS Journal, N°.01, Mai 2002.

[36] : Melle ALI Mounira « *Modélisation et simulation du module photovoltaïque(ATERSA75)* » Mémoire de Master en Mécatronique, Université de BOUMERDES, 2009.

[37] : R. Khezzar, M. Zereg « *Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque* » Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 379 – 388.

[38] : F.Z Zerhouni, « *Adaptation Optimale d'une Charge à un Générateur Photovoltaïque* », Mémoire de Magister, Institut d'Electronique, USTO, 1996.

[39] : A.Meroufel « Contrôle de la machine asynchrone », Simulation avec le logiciel Matlab/Simulink, Université Djillali Liabès –Sidi Bel-Abbès, 2008.

[40] : L.BAGHLI « *Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone* », IUFM de Lorraine–UHP, 2005.

[41] : D.Aguglia « *Identification des paramètres du moteur à induction triphasé en vue de sa commande vectorielle* », mémoire pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences , Université de LAVALQUEBEC, Canada, 2004.

[42]: N.Mansouri, N.Ghanmi « *Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal* » Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008).

Annexes

Annexe 1 : Transformations des systèmes triphasés

➢ Transformée de Park

La **transformée de Park**, est un outil mathématique utilisé en électrotechnique afin de réaliser un changement de repère dans un système d'axe diphasé ou triphasé. Elle est généralement utilisée pour passer d'un repère « fixe » lié au stator d'une machine électrique à un repère tournant lié à son rotor ou au champ magnétique.

Mise en équation :

La transformation directe αβ → dq s'exprime ainsi :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos(\theta) & sin(\theta) \\ -sin(\theta) & cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}$$

La transformation inverse dq → αβ s'exprime ainsi :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos(\theta) & -sin(\theta) \\ sin(\theta) & cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix}$$

Il s'agit juste de rotation de repères.

➢ Transformée de Clarke

La **transformée de Clarke**, est un outil mathématique utilisé afin de modéliser un système triphasé grâce à un modèle diphasé.

Un système triphasé constitué de bobines et de courants déphasés entre eux de $\frac{2\pi}{3}$ permet de créer un champ tournant à la vitesse ω. Un système diphasé constitué de deux bobines perpendiculaires l'une par rapport à l'autre et parcourues par des courants déphasés entre eux de $\frac{\pi}{2}$ permet de créer un champ tournant à la vitesse ω.

Matrices de transformation

Le but est de trouver les valeurs de x_α et x_β à partir de x_a , x_b et x_c. On peut modéliser le champ tournant créé par système triphasé par un système diphasé grâce aux transformations suivantes :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = C_{23} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad et \quad \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}$$

Pour résoudre ce système, l'axe 0_a et 0_α sont choisis parallèle à l'axe des réels. L'axe 0_β est généralement choisi indirect par rapport à l'axe 0_α. Ce n'est qu'une convention qui inverse les signes de la seconde colonne.

Ainsi:

$$\begin{bmatrix} 0_a \\ 0_b \\ 0_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ e^{-j\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix} \quad et \quad \begin{bmatrix} 0_\alpha \\ 0_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$$

Trouver les matrices C_{32} et C_{23} revient à résoudre le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} = C_{23} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ e^{-j\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix} \quad et \quad \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ e^{-j\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$$

Ce qui donne :

$$C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad et \quad C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}.$$

Avec $\forall x \quad x_a + x_b + x_c = 0$

Il existe aussi une transformation de Concordia qui est la même que celle de Clarke mais qui est normée.

➢ Transformée de Concordia

La **transformée de Concordia**, est utilisée afin de modéliser un système triphasé grâce à un modèle diphasé.

Mise en équations

On peut modéliser le champ tournant créé par système triphasé par un système diphasé grâce aux transformations suivantes :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{23} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad et \quad \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Avec:

$$C_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad et \quad C_{32} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix}$$

Si on veut conserver la composante homopolaire les transformations deviennent :

$$\begin{bmatrix} m_h \\ m_\alpha \\ m_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_a \\ m_b \\ m_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} m_a \\ m_b \\ m_c \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} m_h \\ m_\alpha \\ m_\beta \end{bmatrix}$$

Avec:

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix}$$

Annexe 2 : **Algorithme pour trouver le point de puissance maximale dans la cellule PV**

```
% find maximum power point in the PV cell data generated by pv1.mdl
pmax = max(PV.signals.values(:,2));
vrange = max(PV.signals.values(:,1));
irange = max(PV.signals.values(:,3));
[tf,index]=ismember(pmax,PV.signals.values(:,2));
disp(' MPP power: ')
disp(PV.signals.values(index,2));
disp(' MPP voltage: ')
disp(PV.signals.values(index,1));
disp(' MPP current: ');
disp(PV.signals.values(index,3));
figure(1)
plot(PV.signals.values(:,1),PV.signals.values(:,2)); % plot P(Vpv)
axis([0 vrange 0 pmax]);
figure(2)
plot(PV.signals.values(:,1),PV.signals.values(:,3)); % plot Ipv(Vpv)
axis([0 vrange 0 irange]);
```

Annexe 3 : Algorithme de MPPT « perturbations et observations »

```
% Simple MPP "perturb and observe" tracking algorithm
% using Boost DC-DC input current Iref as the control variable
% Pold, Iref and Increment are initialized in InitializeMPPtrackIref.m
% Input: power P to be maximized
% Output: reference current
function y = MPPtrackIref(P)
global Pold;
global Iref;
global Increment;
IrefH = 5; % upper limit for the reference current
IrefL = 0; % lower limit for the reference current
DeltaI = 0.02; % reference current increment
if (P < Pold)
    Increment = -Increment; % change direction if P decreased
end

% increment current reference
Iref=Iref+Increment*DeltaI;
% check for upper limit
if (Iref > IrefH)
    Iref = IrefH;
end
% check for lower limit
if (Iref < IrefL)
    Iref = IrefL;
end

% save power value
Pold = P;
% output current reference
y = Iref;
```

Annexe 4 : Paramètres caractéristiques du générateur PV et du groupe motopompe

- **Module photovoltaïque : « Shell SP 75 »**

Température aux conditions standard	$T = 25^0$ C
Eclairement aux conditions standard	$E = 1000$ W/m^2
Tension de circuit ouvert	Vco =21.7 V
Courant de court-circuit	Icc =4.8 A
Puissance maximale	Pm = 75 W
Tension au point de la puissance maximale	Vm = 17.2 V
Courant au point de la puissance maximale	Im = 3.5 A
Longueur	L = 1200 mm
Largeur	A = 527 mm
Epaisseur	E = 56 mm
Poids	Pd = 7.6 Kg

- **Moteur asynchrone: «** 3 HP Drive »

Tension	V = 220 V
Résistances statorique du moteur	Rs = 0.01485 Ω
Résistances rotorique du moteur	Rr = 0.00929 Ω
Inductances propres d'un enroulement du stator	Ls = 0.3027 mH
Inductances propres d'un enroulement du rotor	Lr = 0.3027 mH
Inductances mutuelle	Lm = 0.3027 mH
Nombre de paires de pôles du moteur	p = 2

- **Pompe centrifuge**

Performances de la pompe à une vitesse de 2900 tr/min :

Débit maximal	Qmax = 30 m^3 /h.
Relevage maximal	Hr = 80 m.
Puissance moteur	Pm = 14 kW.